



António Miguel Costa Quintela de Saldanha

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Desenvolvimento de uma máquina de limpeza e de cura para peças impressas em SLA

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador:	Bruno Alexandre Rodrigues Simões Soares, Professor Auxiliar Convidado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
Co-Orientador:	Alberto José Antunes Marques Martinho, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
Presidente do júri:	António José Freire Mourão, Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
Arguente:	Marco Alexandre de Oliveira Leite, Professor Auxiliar Convidado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2019

Desenvolvimento de uma máquina de limpeza e cura para peças impressas em SLA.

Copyright © 2018 António Miguel Costa Quintela de Saldanha, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer em primeiro lugar ao Prof. Bruno Soares e ao Prof. Alberto Martinho pela sua orientação e ajuda durante o desenvolvimento desta dissertação, pautada por um elevado e rigoroso nível científico os quais contribuíram para enriquecer passo por passo, todas as etapas subjacentes ao trabalho realizado.

Gostaria também de agradecer à minha família por todo o apoio durante o meu percurso académico.

Gostaria de agradecer aos meus amigos e colegas por todo o companheirismo e amizade e sem os quais esta experiência académica não teria sido a mesma.

Por último, dirijo um agradecimento especial à Miriam Sommer, Diogo Nascimento, Carlos Guimarães e Duarte Bragadesto pelo seu apoio incondicional, amizade e paciência demonstrados durante os inúmeros desafios, tristezas, incertezas, alegrias e percalços pelo caminho.

Resumo

A manufatura aditiva (MA) tem crescido nos últimos anos. A sua inicial função de prototipagem rápida e aceleração do processo de desenvolvimento de produto é ainda a sua principal função, embora existam desenvolvimentos no sentido de usar estas técnicas para o fabrico de produtos de utilização final como já se começa a verificar em várias empresas. Devido às suas características, os processos de manufatura aditiva parecem ter o seu espaço no mercado, em especial na produção de pequenas séries e produtos personalizados.

As peças fabricadas por MA com a tecnologia *Stereolithography* (SLA), após serem retiradas da impressora, encontram-se revestidas de resina não curada e as próprias peças estão apenas parcialmente curadas, pelo que nesta fase deve-se utilizar um solvente para retirar toda a resina não curada da superfície de modo a obter um melhor acabamento superficial. Após as peças estarem limpas é necessário curar totalmente as peças para estas obterem as suas propriedades finais.

Esta dissertação aborda o desenvolvimento de uma máquina que realiza a limpeza e cura de peças impressas pela tecnologia SLA, construída com uma combinação de peças obtidas por MA e processos convencionais. A impressora utilizada durante a prototipagem foi a *Original Prusa i3 MK3*.

A metodologia de desenvolvimento de produto foi aplicada com estabelecimento de necessidades e especificações que levaram à geração e seleção de conceitos. Foi produzido um protótipo do conceito mais promissor e este foi testado para estabelecer as especificações finais.

Por fim, foi desenvolvido um custo de prototipagem com o material e energia utilizados para calcular o custo total unitário do protótipo e realizar uma aproximação de um eventual produto final, através de duas opções apresentadas.

Palavras-chave: Manufatura aditiva (MA); impressão 3D; *stereolithography* (SLA); pós-processamento; limpeza e cura; desenvolvimento de produto; custo de prototipagem.

Abstract

Additive manufacturing (AM) has been growing in the last few years. Its initial function of rapid prototyping and accelerated product development is still its main function, although there has been a progression regarding the manufacturing of end use products. Due to their characteristics, AM processes seem to have their place in the market on the production of small series and customizable products.

The parts manufactured by AM using the Stereolithography (SLA) technology, after being printed, are only partially cured and are covered with uncured resin. At this stage it is necessary to use a solvent to remove all this uncured resin in order to obtain a better surface finish. After being clean, the parts need to be fully cured in order to achieve their final properties.

This dissertation addresses the development of a machine which cleans and cures the parts printed by SLA, built by a combination of parts obtained by AM parts and conventional processes. The 3D printer used during the prototyping was the Original Prusa i3 MK3.

The methodology of product design and development was applied with the establishment of needs and specifications which led to concept generation and selection. The most promising concept was prototyped and tested in order to establish the final specifications.

Lastly, the prototype costs were calculated using the material and energy used. The prototype unit cost was calculated and a rough estimate was presented for a potential final product by presenting two alternatives.

Keywords: Addictive manufacturing (AM); 3D printing; stereolithography (SLA); post-processing; wash and cure; product development; prototyping cost.

Índice

Agradecimentos.....	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Índice de figuras.....	xiii
Índice de tabelas	xv
Lista de acrónimos	xvii
Introdução	1
1.1 Motivação do trabalho	1
1.2. Objetivo da dissertação	2
Manufatura aditiva	3
2.1. Introdução	3
2.2. Breve história da MA	4
2.3. Funcionamento da impressão 3D	6
2.4. Tecnologias principais.....	7
2.4.1. SLA - Estereolitografia	7
2.4.2. SLS – <i>Selective Laser Sintering</i>	8
2.4.3. <i>Inkjet Printing / Polyjet</i>	8
2.4.4. LOM – <i>Laminated Object Manufacturing</i>	9
2.4.5. FDM – <i>Fused Deposition Modelling</i>	10
Contexto do trabalho.....	11
3.1. Tecnologia SLA.....	11
3.2. Problemática da SLA	12
3.3. Álcool isopropílico no pós-processamento	13
3.4. Tecnologias existentes.....	14
3.4.1. Ultrassons	14
3.4.2. Outros métodos	14
Metodologia utilizada	15
4.1. Desenvolvimento de produto	15
Concepção e projeto do produto	19
5.1. Declaração de objetivos.....	19
5.2. Definir as necessidades.....	21
5.2.1. Recolher dados em bruto de clientes	21
5.2.2. Interpretar os dados brutos para as necessidades dos clientes	22
5.2.3. Organizar as necessidades hierarquicamente	24
5.2.4. Estabelecer a importância relativa das necessidades	25
5.2.5. Refletir nos resultados e no processo	27
5.3. Especificações do produto	27
5.3.1. Preparar a lista de métricas.....	29
5.3.2. Realizar uma análise comparativa	30
5.3.3. Determinar valores alvo ideais e marginalmente aceitáveis.....	32
5.3.4. Casa da qualidade	32

5.3.5. Refletir nos resultados e nos processos	36
5.3.6. Definir as especificações finais	36
5.4. Geração de conceitos.....	40
5.4.1. Método de agitação do IPA	44
5.4.2. Método de cura	46
5.5. Seleção de conceito	47
5.6. Construção do conceito	49
5.6.1. Modelação CAD.....	50
5.6.2. Impressão de peças e compra de componentes à medida	62
5.6.3. Maquinação de componentes e montagem.....	65
5.6.4. Controlo da qualidade final	67
5.6.5. Instalação elétrica	69
5.7. Protótipo, testes e especificações finais	70
Custos conceptuais	75
6.1. Estrutura de custos	75
6.1.1. Custo do equipamento.....	76
6.1.2. Custo da matéria prima	76
6.1.3. Custo de energia	77
6.1.4. Peças/componentes comprados.....	78
6.1.5. Custo de mão-de-obra.....	78
6.2. Medições e cálculo dos custos de prototipagem	79
6.3. Comparação geral.....	80
Conclusões e trabalho futuro.....	81
7.1. Trabalho futuro.....	82
Referências bibliográficas	83
Anexos	87
Anexo A – Entrevistas.....	87
Anexo B – Lista de peças.....	103
Anexo C – Vistas da máquina.....	107
Anexo D – Desenhos técnicos 2D	113

Índice de figuras

Figura 1.1: Exemplo do efeito escada resultante da fabricação por camadas,	1
Figura 1.2: Estruturas de suporte de ligação à plataforma de construção de ambos os sistemas SLA, [4].....	2
Figura 2.1: Modelo de uma peça em CAD (esquerda) e modelo impresso (direita).....	4
Figura 2.2: RepRap versão I “Darwin”. Construída em Maio de 2007, [11].	5
Figura 2.3: As oito etapas do processo genérico, de CAD até à peça final, [5].	6
Figura 2.4: Esquematização da técnica SLA, [7].....	8
Figura 2.5 : Representação esquemática de uma impressora SLS 3D, [19].	8
Figura 2.6: Representação esquemática de uma impressora Polyjet 3D, [2].	9
Figura 2.7: Representação esquemática de tecnologia LOM, [17].	10
Figura 2.8: Representação esquemática de tecnologia FDM, [2].	10
Figura 3.1: Exemplo de uma máquina típica de agitação ultrassónica.	14
Figura 4.1: Principais atividades que abrangem a fase do desenvolvimento de conceito, adaptado de [1].....	15
Figura 5.1: Etapas da geração de conceitos	40
Figura 5.2: FormLabs Wash&Cure.....	41
Figura 5.3: Original Prusa Curing and Washing Machine.....	41
Figura 5.4: Ciclo de construção simplificado da máquina.....	49
Figura 5.5: Ilustração em CAD de um recipiente.....	50
Figura 5.6: Ilustração do mecanismo principal em CAD com legenda dos componentes.....	51
Figura 5.7: Ilustração da estrutura do mecanismo principal da máquina em CAD.....	52
Figura 5.8: Parte inferior do braço.....	53
Figura 5.9: Parte superior do braço.....	53
Figura 5.10: Suporte, do motor central, superior e inferior dos varões, respectivamente.....	54
Figura 5.11: Caixa exterior da máquina, com os recipientes inseridos.	54
Figura 5.12: Deslocamento vertical máximo do mecanismo principal (em milímetros).....	55
Figura 5.13: Caixa exterior redesenhada com o mecanismo e um dos recipientes.	56
Figura 5.15: Placa traseira	57
Figura 5.14: Placa inferior (base)	57
Figura 5.16: Parte frontal da caixa exterior (4 peças).....	57
Figura 5.17: Gaveta de arrumação.....	58
Figura 5.19: Montagem da máquina com as peças já modeladas.....	59
Figura 5.18: Cobertura do controlador eletrónico.....	59
Figura 5.20: Mecanismo do sistema de elevação das tampas.	60
Figura 5.21: Sistema de elevação das tampas dos recipientes.....	60
Figura 5.22: Suporte a) dos motores de vibração b) das ventoinhas.	61
Figura 5.23: Suportes dos sensores (a) e b)) e suporte de cabos (c).	61
Figura 5.24: Montagem final da máquina em CAD.....	62
Figura 5.25: Original Prusa Mk 3.....	63
Figura 5.26: Modelo do mecanismo principal impresso à escala.	63
Figura 5.27: Deformação observada em peças esbeltas de grande dimensão.	64
Figura 5.28: Fase intermédia da montagem final.....	65

Figura 5.29: Protótipo final da máquina.	66
Figura 5.30: Diferença na direção de impressão numa peça com a mesma força aplicada.	67
Figura 5.31: Falha por rutura nos suportes dos varões.	67
Figura 5.32: Peças de vibração montadas nos motores,.....	68
a) 1ª versão b) 2ª versão.....	68
Figura 5.33: Modelação final do braço em CAD.	69
Figura 5.34: Montagem final dos componentes elétricos.	70
Figura 5.35: Interruptores de controlo.	71
Figura 5.36: Peças de teste.....	72
Figura 5.37: Remoção de resina	72
Figura 6.1: Fontes de custo.....	75
Figura 6.2: Informações de impressão.	77

Índice de tabelas

Tabela 2.1: tecnologias de MA, respectivos exemplos e materiais, [16].	7
Tabela 3.1: Tempo de processamento dos subprocessamentos, adaptada de [22].	12
Tabela 3.2: Ganho de peso em percentagem de um cubo 1x1x1 cm imerso nos respectivos solventes em 24 horas, adaptado de [25].	13
Tabela 5.1: Declaração de objetivos.	20
Tabela 5.2: Declarações obtidas nas entrevistas e respetivas interpretações.	23
Tabela 5.3: Organização hierárquica das necessidades através da atribuição de valores de importância	24
Tabela 5.4: Importância das necessidades e subconjunto das necessidades, escala de 1 a 5.	26
Tabela 5.5: Necessidades dos clientes para a máquina e as suas importâncias relativas.	28
Tabela 5.6: Lista de métricas.	29
Tabela 5.7: Matriz das necessidades – métricas	30
Tabela 5.8: Análise competitiva baseada nas métricas.	31
Tabela 5.9: Legenda da casa da qualidade.	33
Tabela 5.10: Corpo da casa da qualidade, relação entre as necessidades e as especificações.	34
Tabela 5.11: Telhado da casa da qualidade, relação entre as especificações.	35
Tabela 5.12: Especificações finais	37
Tabela 5.13: Conceitos gerados.	42
Tabela 5.14: Opções de agitação do IPA, [34].	44
Tabela 5.15: Análise de conceitos para seleção da opção de agitação do IPA.	45
Tabela 5.16: Opções de lâmpadas ultravioleta, [34].	46
Tabela 5.17: Análise de conceitos para seleção da opção de cura.	46
Tabela 5.18: Matriz de Pugh para seleção do conceito.	48
Tabela 6.1: Custo do equipamento por hora.	76
Tabela 6.2: Custo e tempo de produção do protótipo.	77
Tabela 6.3: Custo de peças compradas.	78
Tabela 6.4: Custo por hora de mão-de-obra.	79
Tabela 6.5: Custo energético por unidade.	79
Tabela 6.6: Custo total por unidade.	79

Lista de acrónimos

°C	Graus Celsius
μm	Micrómetro
3D	Tridimensional (Three-Dimensional)
AM	Manufatura aditiva (Additive Manufacturing)
CAD	Desenho assistido por computador (Computer-Aided Design)
CNC	Comando Numérico Computadorizado
FDM	Fused Deposition Modelling
IPA	Álcool Isopropílico
KWh	Quilowatt-hora
LED	Diodo Emissor de Luz
LOM	Laminated Object Manufacturing
MA	Manufatura aditiva
mm	Milímetro
PLA	Ácido Polilático
PR	Prototipagem rápida
SGC	Solid Ground Curing
SLA	Estereolitografia (Stereolithography)
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Tessellation Language
UV	Ultravioleta
W	Watt

Introdução

1.1 Motivação do trabalho

A manufatura aditiva (MA) é uma tecnologia capaz de construir objetos 3D complexos, “empilhando” sucessivas camadas finas individuais. Por utilizar este método aditivo, o grau de liberdade desta tecnologia em relação à complexidade da forma aumenta bastante quando comparada com os processos subtrativos como o torneamento ou a maquinagem. Por esta razão, a MA tem crescido muito nos últimos anos sendo a sua aplicação inicial de prototipagem rápida (PR) e aceleração do processo de desenvolvimento de produto ainda a sua principal função, embora existam desenvolvimentos no sentido de utilizar estas técnicas para o fabrico de produtos de utilização final. Devido às suas características, os processos de manufatura aditiva parecem ter o seu espaço no mercado, em especial, na produção de pequenas séries e produtos personalizados como é o caso da aplicação médica desta tecnologia, onde as especificações geométricas de cada paciente são necessárias (ex. ortopedia, medicina dentária, aparelhos auditivos) [1].

Para obter um bom acabamento de superfície nas peças fabricadas, camadas finas de impressão são fundamentais como podemos observar na figura 1.1. As técnicas modernas de MA usam camadas com uma espessura entre 15 e 100 μm . Quanto mais finas forem as camadas, mais suave vai ser a superfície da peça, o que geralmente leva também a um aumento do tempo de impressão [2][3].

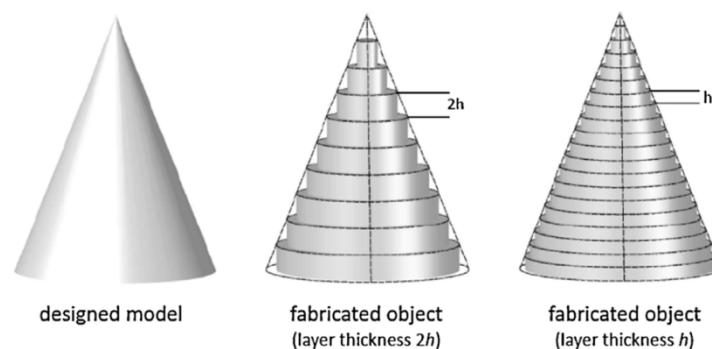


Figura 1.1: Exemplo do efeito escada resultante da fabricação por camadas .

Uma vez removida as peças da impressora 3D, estas podem necessitar de uma limpeza adicional antes de estarem aptas a serem utilizadas. As peças nesta fase podem estar fracas, por ainda não estarem curadas ou sinterizadas, ou podem ter elementos de suporte quem têm de ser removidos, como é possível observar na figura 1.2, pelo que habitualmente é necessário tempo, cuidado e manipulação manual experiente.



Figura 1.2: Estruturas de suporte de ligação à plataforma de construção de ambos os sistemas SLA, [4].

É exatamente neste processo de limpeza da peça e cura das peças que esta dissertação se vai focar. Nesta fase não é necessário entender exatamente como funcionam as estruturas de suporte, no entanto é necessário saber que estas precisam de ser tratadas. Apesar de terem sido desenvolvidos alguns processos para facilitar a remoção destes suportes, há frequentemente a necessidade elevada de trabalho manual, [5].

Desta forma, esta tese vai abordar o desenvolvimento de uma máquina que faz a limpeza e cura das peças impressas em 3D. Neste caso específico, a tecnologia de MA em estudo vai ser *Stereolithography* SLA, utilizando para tal a impressora Form 1+.

1.2. Objetivo da dissertação

O objetivo da dissertação será analisar, projetar e construir um sistema de limpeza e cura para peças impressas em 3D, concretamente peças impressas em resina com a tecnologia SLA(*stereolithography*). Para tal, serão analisados vários métodos e variações dos mesmos para melhor determinar qual o processo mais eficaz de acordo com os objetivos. Depois de escolhida a tecnologia a utilizar, será então projetada a máquina de acordo com o livro *Product Design and Development* [6], e, posteriormente, construída e testada, analisando no final a funcionalidade e eficácia da mesma.

Manufatura aditiva

2.1. Introdução

A manufatura aditiva é o termo utilizado para o que antigamente se chamava prototipagem rápida (PR) e, que nos dias de hoje, é popularmente conhecida por impressão 3D. A prototipagem rápida é um termo descrito numa variedade de indústrias como um processo que rapidamente cria a representação de um sistema ou parte, antes de estes serem finalizados e comercializados. Basicamente, é criar algo rápido que sirva de protótipo ou modelo base para futuros modelos e para um eventual produto final. Os utilizadores da tecnologia PR acabaram por reconhecer que este termo era inadequado e que não descrevia eficazmente as mais recentes aplicações desta tecnologia, [7].

Um aumento na qualidade do output destas máquinas fez com que, hoje em dia, exista um aumento de peças sejam diretamente fabricadas nestas máquinas, pelo que já não seria correto denominar este processo como “prototipagem”. Foi então que se passou a utilizar o termo manufatura aditiva (MA) do inglês *additive manufacturing* (AM).

O princípio básico da MA funciona com um modelo, inicialmente gerado utilizando um software de design de três dimensões (3D CAD) que é posteriormente fabricado diretamente sem a necessidade de planejar o processo de fabrico. Apesar de não ser tão simples como parece, a MA simplifica o processo de produzir objetos 3D diretamente a partir de ficheiros CAD. No entanto, projetar peças funcionais requer um entendimento da tecnologia, e requer uma mudança na forma de pensar e projetar peças nomeadamente na orientação, a possibilidade de vazios, raios de curvatura e quantidade de suporte. Todos estes parâmetros tem de ser tomados em consideração quando se imprime uma peça por MA.

Outros processos de fabrico requerem uma cuidada e detalhada análise da geometria da peça para determinar a ordem de processos, parâmetros, ferramentas, acessórios e instalação necessária.

Esta tecnologia funciona, fundamentalmente, através da adição de camadas de material para formar uma peça; cada camada é uma secção transversal da peça derivada do ficheiro CAD. Obviamente no mundo físico, cada camada tem uma espessura limite, pelo que a peça final será uma aproximação do ficheiro original como podemos observar na figura 2.1. Quanto mais finas forem as camadas, mais detalhada e mais perto do desenho CAD será a peça.

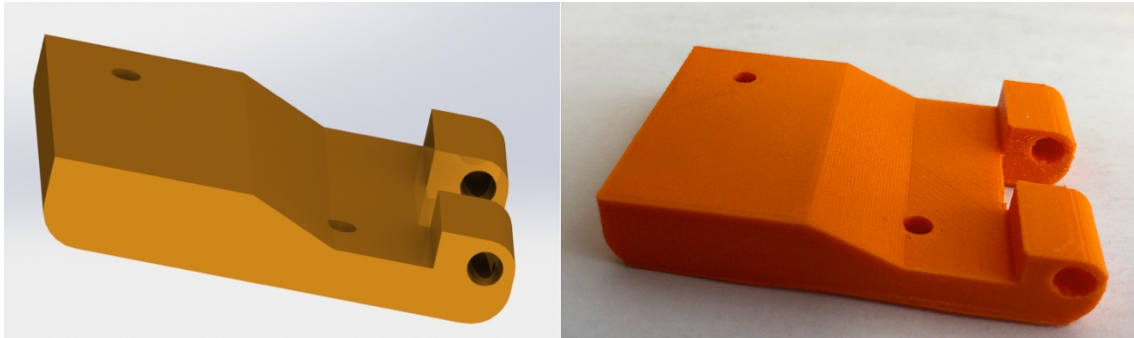


Figura 2.1: Modelo de uma peça em CAD (esquerda) e modelo impresso (direita)

Todas as máquinas de MA comercializadas até hoje, utilizam o método de camada a camada, e as suas principais diferenças estão nos materiais que podem ser utilizados, na maneira como as camadas são criadas e como são unidas as mesmas. Estas diferenças vão determinar fatores como a precisão da peça final e as suas propriedades materiais e mecânicas. Vão também determinar fatores como a rapidez de fabrico, a quantidade de pós-processamento necessária, o tamanho da máquina de MA a utilizar e o custo de todo o processo.

2.2. Breve história da MA

Hideo Kodama, do Nagoya Municipal Industrial research Institute, foi o inventor do primeiro sistema de impressão 3D em 1981 [8], apresentando três técnicas para criar objetos tridimensionais usando luz ultravioleta num polímero foto-endurecido. No entanto, a patente que Hideo solicitou, expirou antes de esta ser submetida à fase de examinação.

A primeira patente para Stereolithography (Patente #US4575330) foi concedida em 1986 a Charles Hull, que criou a empresa 3D Systems, [9]. Um ano depois, esta mesma empresa lançou o primeiro sistema de MA comercialmente disponível, a SLA-1. A principal contribuição de Charles e do trabalho da sua equipa foi a criação do ficheiro com formato STL, ainda usado na atualidade. Em 1988 uma nova patente foi apresentada por Carl Deckard para outra tecnologia MA, a *Selective Laser Sintering* (SLS), comercializada pela empresa DTM que por sua vez foi comprada mais tarde pela 3D Systems.

Não tardou muito até surgirem novas tecnologias de MA, sendo que em 1991 foram comercializadas três novas tecnologias: a *Fused Deposition Modelling* (FDM) da empresa Stratasys, a *Solid Ground Curing* (SGC) da empresa Cubital e a *Laminated Object Manufacturing* (LOM) da empresa Helisys, [10].

Em 1990 na Europa, mais concretamente na Alemanha, foi fundada a empresa Electro Optical Systems (EOS) que criou a primeira EOS Stereos *Stereolithography System* para prototipagem industrial e aplicações de produção de impressão 3D. Durante os anos 90, surgiram mais empresas que fabricavam impressoras 3D, em conjunto com novas tecnologias e o desenvolvimento de ferramentas CAD. No ano 2000 foi impresso, com sucesso, um rim e a empresa MCP Technologies introduziu a tecnologia *Selective Laser Melting* (SLM).

Em 2005 a Z Corp lançou a primeira impressora 3D de alta definição que imprimia peças com cores, e as patentes existentes de MA começaram a expirar o que deu início ao projeto RepRap, criado com o objetivo de produzir uma impressora 3D capaz de se reproduzir a si mesma (Figura 2.2). Este projeto levou a um crescimento das impressoras 3D (de FDM) de secretária e da popularidade desta tecnologia na comunidade dos “criadores/ inventores”.

Em 2009 todas as patentes de FDM caíram em domínio público, abrindo assim portas para um mar de inovações em impressoras 3D FDM e, por consequência, uma queda nos preços e um aumento de visibilidade dada esta nova facilidade de acesso a esta tecnologia.

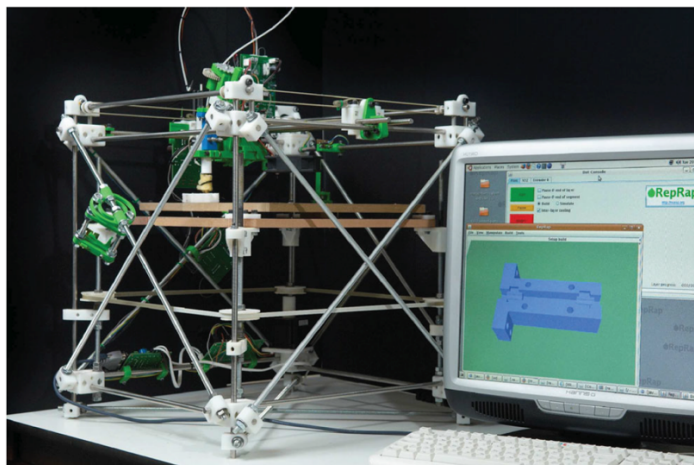


Figura 2.2: RepRap versão I “Darwin”. Construída em Maio de 2007, [11].

A MA fornece, tecnologicamente, controlo sobre a forma, composição e função dos produtos fabricados, sem antecedentes assim como um alto nível de personalização individual. Aclamada por alguns como a “quarta revolução industrial”[12], os processos de MA têm potencial para revolucionar a rentabilidade da produção de produtos complexos que não podem ser fabricados facilmente utilizando métodos convencionais. Utilizando a MA, os produtos podem ser fabricados numa grande variedade de tamanhos (desde nanómetros até dezenas de metros), materiais (metais, polímeros, cerâmica, compósitos e suporte no crescimento de tecidos orgânicos). As suas aplicações incluem elementos eletrónicos flexíveis e isolantes; produtos leves de alta resistência para estruturas aeroespaciais com um gradiente de materiais; medicamentos personalizados e até órgãos humanos, [13].

2.3. Funcionamento da impressão 3D

A tecnologia de MA consiste em três passos básicos, [14]:

- 1 – Um modelo computadorizado 3D é desenvolvido e convertido num ficheiro de MA tradicional como o *Standard Tessellation Language* (STL) ou um formato de ficheiro mais recente;
- 2 – O ficheiro é enviado para um software (Slicer) onde este é manipulado. ex: tamanho, orientação da peça, parâmetros de impressão, etc;
- 3 – A peça é construída camada por camada na máquina de MA.

A MA envolve vários passos que transformam o ficheiro virtual CAD para a peça física final. Diferentes produtos vão envolver a MA em diferentes maneiras e níveis como podemos ver mais detalhadamente na figura 2.3.

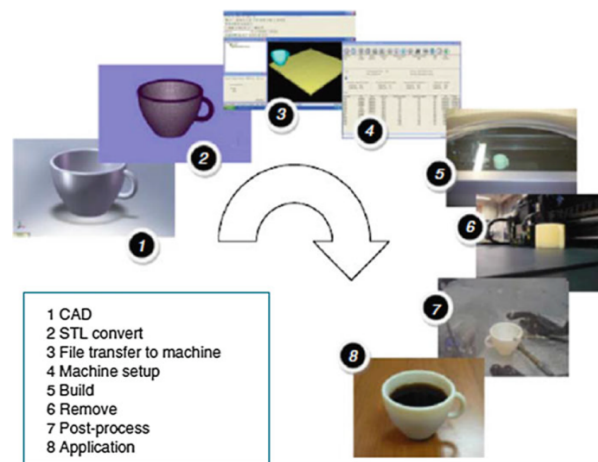


Figura 2.3: As oito etapas do processo genérico, de CAD até à peça final, [5].

Os processos de MA podem ser categorizados pelo tipo de material usado, a técnica de depósito, ou pela forma com que o material é fundido ou solidificado. O comité ASTM F42 (*American Society for Testing and Materials*) [15], categorizou os processos de MA em sete áreas diferentes como demonstrado na seguinte tabela:

Tabela 2.1: tecnologias de MA, respectivos exemplos e materiais, [16].

Tecnologia	Exemplo	Material
<i>Vat photopolymerization</i>	<i>SLA</i>	<i>Photopolymer and ceramics</i>
<i>Material jetting</i>	<i>Polyjet</i>	<i>Photopolymer and wax</i>
<i>Binder jetting</i>	<i>3D printers by powder and binder</i>	<i>Metal, polymer and ceramic</i>
<i>Material extrusion</i>	<i>FDM (fused deposition modeling)</i>	<i>Polymer</i>
<i>Powder bed fusion</i>	<i>SLS (selective laser sintering)</i>	<i>Metal, polymer and ceramic</i>
<i>Sheet lamination</i>	<i>Sheet Forming</i>	<i>Hybrids, metallic and ceramic</i>
<i>Directed energy deposition</i>	<i>laser cladding</i>	<i>Metal: poder and wire</i>

2.4. Tecnologias principais

Em seguida serão apresentados os processos específicos mais comuns e relevantes.

2.4.1. SLA - Estereolitografia

A SLA é uma das mais importantes tecnologias de MA atualmente disponíveis. Esta tecnologia implica a cura ou solidificação de um líquido polimérico fotossensível através do uso de uma fonte de irradiação de luz, que por sua vez fornece a energia requerida para induzir a reação química (reação de cura), unindo grandes quantidades de pequenas moléculas, e formando uma densa rede polimérica. Onde o feixe de laser atinge a resina, a polimerização começa e solidifica a resina líquida. A plataforma de impressão é rebaixada na direção Z – direção na qual se vai formar uma nova camada. Já que as resinas líquidas não são capazes de estabilizar geometrias, é necessário gerar estruturas de suporte, [17].

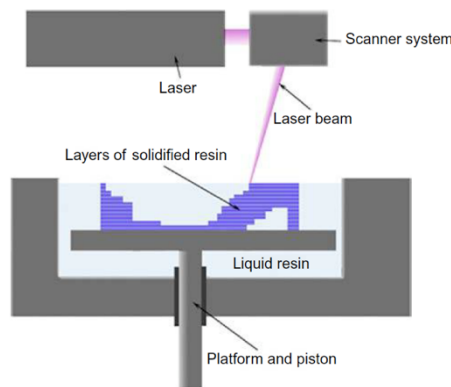


Figura 2.4: Esquemática da técnica SLA, [7].

2.4.2. SLS – *Selective Laser Sintering*

O SLS é uma tecnologia à base de materiais em pó que utiliza feixes de laser contínuos ou por pulsos, como fonte de calor para fazer o varrimento e união dos pós em tamanhos e formas de camadas predeterminadas. A câmara de impressão é aquecida quase até à temperatura de fusão do material de maneira a reduzir o consumo de energia do laser. O material em pó está em repouso numa cama controlada por um pistão que é rebaixado a uma altura equivalente à espessura de cada camada, cada vez que uma camada é concluída. Este processo disponibiliza uma vasta gama de materiais, desde plásticos, metais e combinações. Esta tecnologia tem uma resolução relativamente baixa, que depende do tamanho das partículas do pó. Para partículas mais pequenas, podem acontecer problemas como a aglomeração e oxidação. Outros tipos de problemas podem incluir porosidades, baixa densidade e baixa resistência, [18]. Na figura 2.5 é possível observar uma representação esquemática do funcionamento de uma impressora SLS.

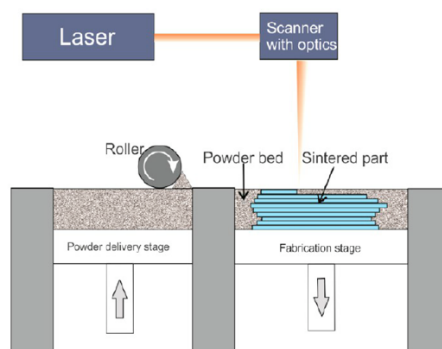


Figura 2.5 : Representação esquemática de uma impressora SLS 3D, [19].

2.4.3. *Inkjet Printing / Polyjet*

Esta tecnologia utiliza jatos de tinta para produzir modelos físicos. Estas impressoras podem operar tanto em modo contínuo como em modo gota-a-gota (*Drop-on-Demand- DOD*). Em modo contínuo, a tinta é bombeada através de um bico para formar um jato líquido. O modo de impressão contínuo é utilizado sobretudo para aplicações gráficas de alta velocidade. No entanto, o método

mais utilizado é o DOD, onde uma cabeça de jato movível de tinta deposita um foto polímero, que é depois curado por lâmpadas ultravioleta após ser terminada a respetiva camada. Esta tecnologia permite imprimir diferentes materiais e cores, pelo que pode imprimir material de suporte solúvel quando necessário. As camadas podem ter uma espessura de 16 μm o que significa que este método tem uma alta resolução apesar de ter uma qualidade de superfície moderada. As peças produzidas, no entanto, têm uma menor resistência quando comparadas com as peças impressas em SLA e SLS, [20]. Na figura 2.6 é possível observar uma representação esquemática do funcionamento destas impressoras.

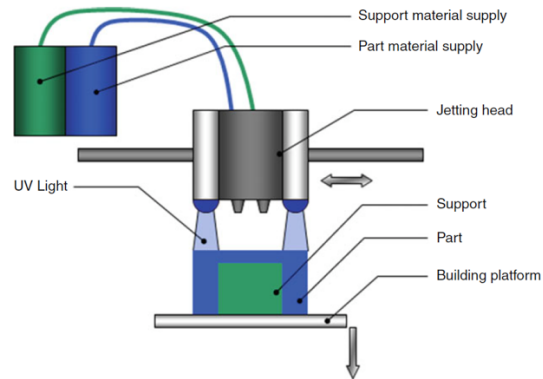


Figura 2.6: Representação esquemática de uma impressora Polyjet 3D, [2].

2.4.4. LOM – *Laminated Object Manufacturing*

Este processo combina tecnologia aditiva e subtrativa para construir peças camada por camada. Uma folha individual é enrolada até à plataforma de impressão onde um ligante é posto sobre a mesma sendo posteriormente colocada outra folha sobreposta à anterior e as duas camadas são fundidas utilizando calor e pressão. Depois da nova camada ser unida, um feixe de laser incide sobre o contorno da peça correspondente a cada camada. A potência do laser é ajustada de maneira a que apenas seja cortada uma folha de material. Uma vez terminada a peça, retira-se o material em excesso para expor a peça final. A principal vantagem deste método é o baixo custo. A resolução das peças produzidas depende da espessura das folhas utilizadas. A remoção do material em excesso pode ser difícil e demorada, [21].

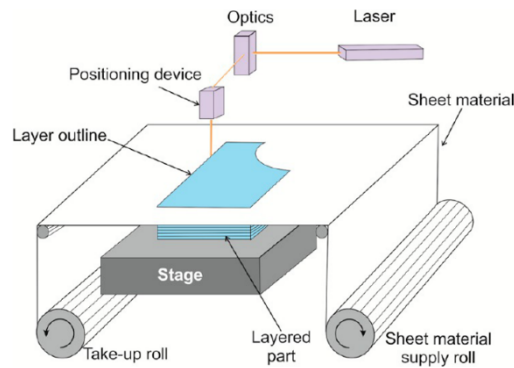


Figura 2.7: Representação esquemática de tecnologia LOM, [17].

2.4.5. FDM – *Fused Deposition Modelling*

Este processo de impressão 3D é um dos mais comuns, devido ao seu baixo custo e também à variedade de modelos destas máquinas disponíveis. É também bastante confiável e requer pouco pós-processamento. O equipamento básico de uma máquina de FDM são as rodas de tração do fio (que levam o fio desde o rolo até ao **nozzle**), um bloco aquecido e um liquidificador (para derreter o filamento) e um pistão (para mover a plataforma no eixo z). O filamento é extrudido num estado semi-fundido na forma de uma tira. A forma desta tira também confere a devida ligação entre camadas. O filamento extrudido que é depositado na plataforma é denominado de “trajeto”. O trajeto solidifica rapidamente depois de ser sobreposto por outro trajeto, [22]. No entanto, este processo tem algumas desvantagens, como o baixo acabamento superficial e a possibilidade de deformação. Na figura 2.8 é possível observar uma representação esquemática do funcionamento destas impressoras.

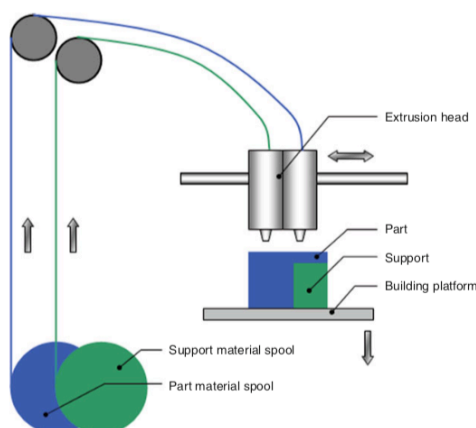


Figura 2.8: Representação esquemática de tecnologia FDM, [2].

Contexto do trabalho

Este capítulo aborda detalhadamente todos os aspectos que estão relacionados diretamente com o trabalho a desenvolver.

3.1. Tecnologia SLA

A manufatura de objetos 3D utilizando a estereolitografia é baseada na solidificação espacialmente controlada de uma resina líquida através da foto polimerização. Usando um feixe de laser ou um projetor de luz digital controlados por computador, um padrão é iluminado na superfície da resina. Como resultado, a resina é solidificada até uma certa profundidade causando a sua adesão à plataforma de suporte. Depois da foto polimerização da primeira camada, a plataforma é movida (no eixo z) da superfície e a camada de construção é revestida outra vez com resina líquida. Um padrão é depois curado nesta segunda camada. Sendo a profundidade da cura ligeiramente maior do que a altura de cada movimento da plataforma, é assegurada uma boa adesão à primeira camada. Estes passos são repetidos até ser construído um objeto sólido tridimensional. No final o objeto é retirado do depósito de resina sendo depois escorrido e lavado o excesso de resina. Nesta fase a resina está apenas parcialmente curada sendo necessária uma pós cura com luz ultravioleta para melhorar as propriedades mecânicas das peças, [23].

O número limitado de resinas comercialmente disponíveis para a tecnologia SLA é frequentemente considerada a principal limitação da mesma. A resina deverá ser um líquido que solidifica rapidamente quando iluminada por uma determinada luz. As primeiras resinas desenvolvidas para uso nestas máquinas eram baseadas em poliacrilato com baixo peso molecular ou epóxi que forma estruturas vítreas. As propriedades das peças construídas por esta tecnologia estão em constante evolução, fazendo que estas sejam úteis não apenas para protótipos, mas também para partes funcionais com aplicações exigentes.

3.2. Problemática da SLA

As máquinas de SLA fabricam peças de resina foto-polimérica diretamente de um modelo CAD sobrepondo camadas na direção oposta da gravidade. Por esta razão são necessárias estruturas de suporte para segurar a resina curada e as camadas formadas durante o processo de fabrico. A remoção destas estruturas de suporte resulta em rebarbas/saliências na superfície das peças. Existe também o efeito escada na superfície das peças, que é mais evidente em superfícies inclinadas, curvas ou que simplesmente não sejam perpendiculares ao feixe de luz que cura a resina. Estes dois defeitos são os principais fatores de um mau acabamento superficial em sistemas SLA. Devido a esta fraca qualidade superficial, a maioria das peças fabricadas por esta tecnologia não são adequadas para uso direto funcional. Estas peças necessitam pós-processamento para melhorar a rugosidade da superfície, sendo que este processo de acabamento requer funcionários qualificados e é relativamente demorado, [24].

O facto de o pós-processamento ser um trabalho intensivo e requerer um trabalhador qualificado, faz com que a minimização de tempo e custos seja bastante importante nas oficinas que trabalham com esta tecnologia. No entanto, existe pouca investigação concentrada no pós-processamento.

O pós-processamento consiste em variados subprocessos como a lavagem, remoção das estruturas de suporte, pós cura e polimento. Na tabela 3.1 podemos observar os tempos de processamento para estes subprocessos.

Tabela 3.1: Tempo de processamento dos subprocessamentos, adaptada de [22].

Processing times (min, mm)							
Test part		A	B	C	D	E	F
Part size		Large	Large	Medium	Medium	Small	Small
Geometry complexity		High	Low	High	Low	High	Low
Pre-processing	STL file verification	3.2	2.4	2.2	1.6	0.7	0.3
	Build direction selection	4.8	3.2	4.2	2.8	2.4	1.7
	Support structure generation and edit	13.2	12.5	12.8	11.5	10.7	10.5
	Layout planning	2.8	2.4	1.9	1.7	0.8	0.5
	NC code generation	5.6	4.5	3.5	3.0	2.2	1.5
Part building		1083	1017	474	478	158	152
Post-processing	Washing	20	20	20	20	20	20
	Support removal	14.8	11.9	8.1	6.2	4.2	2.8
	Post-curing	20	20	20	20	20	20
	Polishing	120	84	95	68	61	41

Large 200×100×100, medium 150×70×50, small 100×50×20; build station SLA 350.

Como podemos observar na tabela, a lavagem e a pós cura requerem constante operação, independentemente da geometria, tamanho e direção de fabrico da peça. No entanto, o tempo necessário para remover as estruturas de suporte é proporcional à área dos suportes ligados à peça e da complexidade da sua geometria. O tempo de polimento está relacionado principalmente à baixa precisão das peças, o qual varia de acordo com a direção de fabrico. O polimento requer bastante tempo e o resultado da qualidade da superfície é altamente dependente da competência dos trabalhadores.

3.3. Álcool isopropílico no pós-processamento

As peças fabricadas em resina pela estereolitografia são formadas principalmente por cadeias poliméricas longas onde as ligações químicas entre essas mesmas cadeias são feitas quando a resina é curada. Quando no final as peças são retiradas da impressora, estas encontram-se parcialmente curadas pelo que nesta fase deve-se utilizar um solvente, não só para remover a resina não curada, como também para remover as estruturas de suporte e dar um melhor acabamento superficial.

O solvente mais utilizado neste caso é o álcool isopropílico (IPA) visto que tem um bom efeito decapante, é de baixo custo e seguro. O IPA, é entre todos os solventes principais, o que melhor se adequa às nossas necessidades. Na tabela 3.2 podemos observar os principais solventes para este efeito já estudados pela empresa *Formlabs*, uma das empresas líder de mercado nas tecnologias de impressão 3D por SLA.

Tabela 3.2: Ganho de peso em percentagem de um cubo 1x1x1 cm imerso nos respectivos solventes em 24 horas, adptado de [25].

Propriedades Mecânicas	Ganho de peso em 24H (%)
Ácido Acético, 5%	<1
Acetona	Amostra rachada
Álcool Isopropílico	<1
Lixivia, ~5% NaOCl	<1
Acetato de butil	<1
Diesel	<1
<i>Diethyl Glycol monomethyl ether</i>	1.7
Óleo Hidráulico	<1
Skydrol 5	1
Peroxido de Hidrogénio (3%)	<1
Iso-octano	<1
Óleo Mineral, leve	<1
Óleo Mineral, pesado	<1
Água salgada (3.5% NaCl)	<1
Hidróxido de Sódio (0.025%, pH=10)	<1
Água	<1
Xileno	<1
Ácido Forte (HCl Conc)	distorcido

3.4. Tecnologias existentes

3.4.1. Ultrassons

A limpeza ultrassônica começou a ser utilizada há relativamente pouco tempo para abordar a problemática existente na impressão 3D. Já existe pelo menos uma empresa, que fabrica máquinas de impressão 3D, que comercializa uma máquina de agitação por movimento para a limpeza das peças impressas em SLA.

Esta tecnologia apesar de já existir desde os anos 50 tem um grande potencial de aplicação na indústria de impressão 3D. A limpeza ultrassônica utiliza bolhas de cavitação induzidas por uma frequência de alta pressão para agitar o líquido onde as peças são mergulhadas. Através deste funcionamento é possível fazer a remoção de contaminantes fortemente aderentes ou embutidos num sólido. Podem ser utilizados água e vários tipos de solventes nestas máquinas dependendo do tipo de material que se pretende remover. Esta tecnologia permite limpar materiais como metais, plásticos, vidro, borracha e cerâmica. A máquina a desenvolver nesta dissertação permite fazer a limpeza e cura de peças impressas em SLA.



Figura 3.1: Exemplo de uma máquina típica de agitação ultrassônica.

3.4.2. Outros métodos

Existem também outros métodos para limpar as peças impressas em 3D, como o simples repouso de uma peça num solvente num determinado tempo. Há também a possibilidade de a limpeza ser feita através de um jato de ar ou água.

Um dos principais objetivos desta dissertação vai ser precisamente analisar métodos alternativos à limpeza ultrassônica de forma a determinar se existem outros processos com os mesmos ou melhores resultados.

Metodologia utilizada

4.1. Desenvolvimento de produto

Para o desenvolvimento deste produto vai ser aplicado o processo de desenvolvimento de produto descrito em [6]. Este tipo de processo caracteriza-se por ser iniciado por uma oportunidade de mercado e selecionando posteriormente tecnologias disponíveis para satisfazer as necessidades do cliente. Geralmente inclui planeamento distinto, desenvolvimento de conceitos, design de sistemas, design detalhado, testes e refinamento, e, melhoramento das fases de produção. As diferentes etapas deste processo encontram-se representadas esquematicamente na seguinte figura (Figura 4.1).

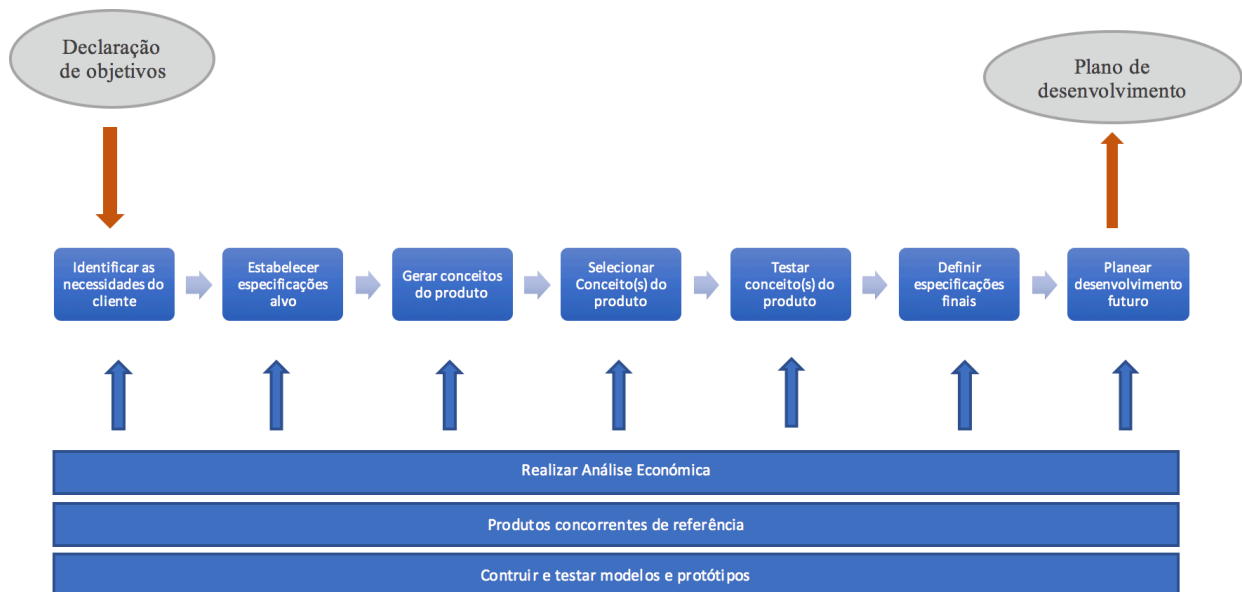


Figura 4.1: Principais atividades que abrangem a fase do desenvolvimento de conceito, adaptado de [1].

Cada uma destas etapas consiste em:

- Identificar as necessidades do cliente: esta atividade consiste num entendimento das necessidades dos consumidores, através de um conjunto de testemunhos cuidadosamente elaborados, organizados hierarquicamente, pelo grau de importância de cada necessidade. No caso deste produto, vamos ter necessidades como segurança, preço, eficácia, facilidade de operação, entre outros.
- Estabelecer especificações alvo: as especificações permitem uma descrição precisa do que o produto tem de fazer. São a tradução das necessidades do cliente para os termos técnicos. Os objetivos para as especificações são definidos numa fase inicial do processo e representam as expectativas da equipa de desenvolvimento. Mais tarde estas especificações são redefinidas para irem de encontro às limitações impostas pelo conceito de produto.
- Geração de conceito: o objetivo desta fase é explorar exaustivamente os conceitos do produto que podem ir de encontro às necessidades do cliente. Esta fase inclui uma combinação de investigação externa, solução criativa de problemas e exploração sistemática de várias soluções geradas. O resultado desta atividade é um conjunto de conceitos, cada um tipicamente representado por um esboço e uma breve descrição do mesmo.
- Seleção de conceito: nesta atividade, os vários conceitos são analisados para identificar o conceito com maior potencial. Este processo requer habitualmente várias iterações e pode dar início ao refinamento e à geração de conceitos adicionais. Esta fase, no âmbito do desenvolvimento desta dissertação, só terá início mais tarde.
- Testes de conceitos: após serem selecionados os conceitos mais promissores, estes serão nesta fase testados para verificar se as necessidades do cliente foram cumpridas, analisar o mercado potencial do produto, e identificar defeitos que necessitem de ser remediados durante o futuro desenvolvimento. Se a resposta do cliente for fraca, o desenvolvimento do produto pode ser terminado ou as atividades anteriores podem ser repetidas consoante o necessário.
- Definir especificações finais: as especificações alvo são definidas numa fase inicial do desenvolvimento e são revistas depois de ser selecionado e testado

um conceito. Nesta fase, é necessário haver um comprometimento a valores específicos das métricas que restringem o conceito de produto, identificar limitações através da modelação técnica, e fazer o equilíbrio entre o custo e a performance.

- Planeamento de projeto: nesta atividade final do desenvolvimento de conceito, é elaborado um calendário detalhado do desenvolvimento, concebendo uma estratégia para minimizar o tempo de desenvolvimento, e identificados os recursos necessários para completar o projeto.
- Análise económica: através de uma análise financeira, é construído um modelo económico para o novo produto. Este modelo é utilizado para justificar a continuação do programa de desenvolvimento geral e resolver indecisões entre, por exemplo, custos de desenvolvimento e custos de fabrico. A análise económica é uma atividade contínua durante o desenvolvimento de conceito.
- Produtos concorrentes de referência: é crucial conhecer e entender os produtos competitivos para ter um posicionamento bem-sucedido de um produto novo, podendo ser uma valiosa fonte de ideias para o produto e para o design do processo de produção.
- Modelagem e prototipagem: em todas as fases do desenvolvimento de conceito estão envolvidas várias formas de modelos e protótipos. Entre estas, estão por exemplo os modelos de validação de conceito, que podem ser exibidos aos clientes de forma a ser avaliada a ergonomia e o estilo do conceito.

Durante o desenvolvimento desta dissertação todas estas atividades apresentadas resumidamente neste capítulo serão analisadas, realizadas e explicadas detalhadamente para que o desenvolvimento deste produto seja bem-sucedido.

Concepção e projeto do produto

5.1. Declaração de objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal contruir um agitador para limpar peças impressas em 3D de acordo com a oportunidade identificada no capítulo anterior. Para tal, é necessário caracterizar o produto em termos de custo, para validar a oportunidade de mercado e a sustentabilidade do método de produção.

Para o desenvolvimento do agitador foi utilizada a metodologia de design e desenvolvimento de produto. O primeiro passo foi definir os objetivos e posteriormente definir as necessidades dos clientes que se refletiram depois em especificações do produto. Este processo levou à geração e seleção de conceitos. Depois da seleção de conceitos, foi construído um protótipo. Este protótipo foi testado para definir as especificações finais. Todo este processo foi iterativo, sendo que em qualquer fase do desenvolvimento, novas informações puderam afetar fases anteriores, levando a alterações.

Foi desenvolvido um custo de prototipagem, assumindo que o agitador seria produzido pelas ferramentas disponíveis na faculdade e segundo o orçamento fornecido. A informação retirada da construção dos protótipos foi bastante útil para obter o custo unitário aproximado do agitador. Foram também analisadas diferentes opções e fatores para determinar qual o efeito que estas teriam no custo unitário.

Para dar início ao processo de desenvolvimento é necessário ter uma direção que especifique a oportunidade em conjunto com os objetivos inerentes e restrições. A maneira de formalizar este processo é fazer a declaração dos objetivos especificando assim qual a direção que vai ser tomada. Na tabela 5.1 é apresentada a versão final da declaração de objetivos.

Tabela 5.1: Declaração de objetivos

Declaração de objetivos: Agitador Para Limpeza de Peças	
Descrição do Produto	<ul style="list-style-type: none"> • Máquina para realizar a limpeza de pós-processamento de peças impressas com tecnologia SLA, funcionamento com álcool isopropílico, de fácil utilização, manutenção simples
Benefícios Propostos	<ul style="list-style-type: none"> • Limpa peças impressas em 3D com maior rapidez e eficácia do que os processos manuais existentes • Processo automatizado, não requer supervisão
Objetivos Chave do Trabalho	<ul style="list-style-type: none"> • Criar um produto único que agregue valor às pessoas/empresas que a utilizem • Ser diferenciado de outras soluções possíveis existentes no mercado • Ter uma quota de mercado de 25% • Ter uma margem de lucro de 50% • Introduzir o produto no mercado no final de 2019
Mercado Primário	<ul style="list-style-type: none"> • Particulares e pequenas empresas • Venda online
Mercado Secundário	<ul style="list-style-type: none"> • Empresas que vendam este tipo de produto • Grandes empresas • Retalho
Pressupostos	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização de tecnologias existentes • Fácil manuseamento e interface amigável • Método de agitação de álcool isopropílico • Pequenas dimensões
Partes Interessadas	<ul style="list-style-type: none"> • Clientes • Empresas que comercializam tecnologia de impressão 3D • Fabricantes de peças/materiais utilizados para construir a máquina • Transportadoras • Centros de serviço

5.2. Definir as necessidades

Através da declaração de objetivos obtemos pressupostos e restrições pelas quais nos podemos guiar para continuar o desenvolvimento do produto no contexto da oportunidade identificada. O próximo passo é estabelecer as necessidades dos clientes. Estas não dependem de nenhum produto em particular que venha a ser desenvolvido, nem é específico a nenhum conceito. São apenas atributos desejados para o produto, expressos em linguagem comum, que manifestam a vontade dos clientes para o que o produto tem de fazer e como o tem de fazer. Uma condição para o produto ter sucesso é ter benefícios perceptíveis, e um produto proporciona benefícios quando satisfaz necessidades. Para este produto, alguns atributos já estão definidos à partida pois estes são um atributo determinante do produto. Por esta razão, características do produto como, funcionar com álcool isopropílico e ser adaptada à tecnologia SLA não serão contabilizadas para nas necessidades.

As necessidades no nosso caso vão ser definidas pelo processo padrão apresentado no livro *Product Design and Development*, que consiste numa etapa de cinco passos:

- 1º. – Recolher dados em bruto de clientes
- 2º. – Interpretar os dados brutos para as necessidades dos clientes
- 3º. – Organizar as necessidades hierarquicamente
- 4º. – Estabelecer a importância relativa das necessidades
- 5º. – Refletir nos resultados e processos

5.2.1. Recolher dados em bruto de clientes

Para o desenvolvimento desta dissertação, as necessidades vão ser definidas por interação com utilizadores que têm experiência no setor em estudo, assim como por investigadores da universidade, baseadas na investigação realizada sobre o pós-processamento existente na impressão 3D.

Esta recolha de dados envolve contacto direto com clientes e experiência com o ambiente de utilização do produto. Para tal, é comum utilizar três métodos:

- Entrevistas – o desenvolvedor do produto discute nas necessidades com um cliente;
- Grupos de foco – é realizada uma discussão com um grupo entre 8 a 12 clientes;
- Observar o produto em utilização – observar alguém a utilizar um produto existente para observar a sua utilização, o que o produto faz bem ou o que está em falta.

Sendo que para os grupos de foco normalmente é necessário pagar a presença dos participantes e no caso da observação do produto em utilização, apenas temos acesso ao processo manual, o processo de recolha de dados em bruto mais adequado no nosso caso são as entrevistas pois são o recurso a que mais facilmente temos acesso. Para tal foram realizadas 7 entrevistas que foram executadas até que novas entrevistas não mostrassem necessidades adicionais às já existentes.

Os pontos chave abordados nas entrevistas foram:

- Quando e porque é que utilizaria este tipo de produto?
- Como seria uma sessão típica da utilização deste produto?
- Se conhece algum produto similar existente, quais as características que o agradam nesse produto?
- O que é que não o agrada em produtos existentes?
- Que aspetos tomaria em consideração ao comprar o produto?
- Que características deveria ter o produto?
- Qual a importância de cada uma dessas características?
- Qual o preço máximo que estaria disposto a pagar pelo produto?

5.2.2. Interpretar os dados brutos para as necessidades dos clientes

Neste passo foram interpretadas as respostas e opiniões das entrevistas para as traduzir em necessidades. O resultado deste passo é uma tabela de declarações dos clientes e as respetivas necessidades interpretadas. As tabelas individuais obtidas em cada entrevista encontram-se no **anexo A**. A seguinte tabela geral, representa as respostas e opiniões mais frequentes em todas as entrevistas e as suas respetivas interpretações:

Tabela 5.2: Declarações obtidas nas entrevistas e respectivas interpretações.

Questões	Declarações do cliente	Interpretação
Uso Típico	Limpeza de resina não curada	A MQ realiza a limpeza das peças impressas de modo a retirar toda a resina não curada.
	Limpeza de peças detalhadas	A MQ realiza a limpeza de pequenos detalhes e orifícios.
	Cura de peças depois da lavagem	A MQ realiza a cura das peças depois de estas serem lavadas.
Prós Produtos/Métodos existentes	Realizam agitação do álcool.	A MQ fornece agitação ao álcool.
	Tem funcionamento automático	A MQ é automatizada
	O processo de cura tem uma mesa giratória.	A MQ cura eficazmente as peças.
Contras Produtos/Métodos existentes	Processo manual.	A MQ é automática.
	Pouco controlo sobre o banho de álcool isopropílico.	A MQ fornece um controlo rigoroso sobre o banho de IPA.
	Pouco detalhe sobre o tempo para os diferentes tipos de resina.	A MQ fornece uma lista com os tempos ótimos de limpeza por tipo de resina.
	Processo demorado.	A MQ realiza a cura automaticamente depois do banho de IPA.
	Não existem acessórios para manusear as peças.	A MQ tem acessórios para manusear as peças.
	As máquinas existentes são muito caras.	As máquinas existentes são muito caras.
Características do produto / Fácil utilização.	Capacidade de tratar várias peças ao mesmo tempo.	A MQ processa múltiplas peças ao mesmo tempo.
	Mostrar melhorias notáveis em relação ao processo “convencional”.	A MQ apresenta melhorias substanciais aos processos manuais.
	Ter um modo de limpeza do álcool.	A MQ filtra o álcool isopropílico.
	Fácil utilização.	A MQ é fácil de utilizar.
	A automatização da máquina.	A MQ funciona de forma automatizada.

Algumas destas podem não ser tecnologicamente viáveis/possíveis. As limitações tecnológicas e económicas estão incorporadas no processo de estabelecimento das especificações de produto e nos passos posteriores de desenvolvimento. Em certos casos foram obtidas necessidades contraditórias, no entanto neste passo não foi necessário resolver este tipo de conflitos. Estes conflitos foram abordados mais tarde no desenvolvimento dos conceitos.

5.2.3. Organizar as necessidades hierarquicamente

Após a realização do primeiro e segundo passo, foi obtida uma lista de 15 declarações de necessidades. O objetivo neste passo foi organizar estas necessidades numa lista hierárquica em que a primeira necessidade é a mais importante. O procedimento da organização foi bastante intuitivo, obtendo então a seguinte tabela:

Tabela 5.3: Organização hierárquica das necessidades através da atribuição de valores de importância

Necessidade	Ordem de Importância
A MQ realiza a limpeza das peças impressas de modo a retirar toda a resina não curada.	1
A MQ realiza a limpeza de pequenos detalhes e orifícios.	2
A MQ realiza a cura das peças depois de estas serem lavadas.	3
A MQ é automática.	4
A MQ fornece agitação ao álcool.	5
A MQ cura eficazmente as peças.	6
A MQ fornece um controlo rigoroso sobre o banho de IPA.	7
A MQ fornece uma lista com os tempos ótimos de limpeza por tipo de resina.	8
A MQ realiza a cura automaticamente depois do banho de IPA.	9
A MQ tem acessórios para manusear as peças.	10
A MQ tem um preço acessível.	11
A MQ processa múltiplas peças ao mesmo tempo.	12
A MQ apresenta melhorias substanciais aos processos manuais.	13
A MQ filtra o álcool isopropílico.	14
A MQ é fácil de utilizar.	15

5.2.4. Estabelecer a importância relativa das necessidades

A tabela hierárquica anterior por si só não fornece qualquer informação da importância relativa que os clientes atribuem às diferentes necessidades. No entanto, durante o desenvolvimento do produto foi necessário realizar escolhas e atribuir recursos ao projetar o produto. O resultado deste passo é uma importância numérica que tem peso num subconjunto de necessidades. Para esta tarefa, foi utilizada a opinião dos investigadores da universidade, estabelecida na experiência com os clientes na recolha de dados em bruto. Deve haver um limite prático de quantas necessidades devem ser abordadas neste passo pois muitas das necessidades são obviamente importantes ou são relativamente fáceis de implementar.

Para proceder então ao estabelecimento da importância relativa das necessidades e do subconjunto das necessidades foi utilizada da seguinte escala de importância:

1. Característica indesejada, não teria em consideração um produto com esta característica.
2. Característica não importante, mas não me importaria de a ter no produto.
3. Característica seria bem-vinda, mas não é necessária.
4. Característica altamente desejável, mas teria em consideração um produto sem a mesma.
5. Característica crítica, não teria em consideração um produto sem a mesma.

Para organizar as necessidades foi criada a seguinte tabela com uma escala de 1 a 5, em que 5 é o maior valor de importância :

Tabela 5.4: Importância das necessidades e subconjunto das necessidades, escala de 1 a 5.

Importância	Necessidade
5	1. A MQ realiza a limpeza das peças impressas de modo a retirar toda a resina não curada.
5	1.1 A MQ realiza a limpeza de pequenos detalhes e orifícios
4	1.2 A MQ fornece agitação ao álcool
3	1.3 A MQ permite o controlo de saturação sobre o IPA
3	1.4 A MQ seca as peças após o banho de IPA
4	1.5. A MQ apenas insere as peças na cura após IPA estar seco da sua superfície
5	1.6 A MQ apresenta maior qualidade das peças tratadas
5	2. A MQ é automática.
5	2.2 A MQ requer o mínimo de interações do utilizador
4	2.3 A MQ transfere a peças/s automaticamente do IPA para a cura
4	3. A MQ é fácil de montar e utilizar
2	3.1 A MQ é fácil de montar
4	3.2 A MQ tem um livro de instruções
2	3.3 A MQ requer o mínimo de ferramentas para ser montada
2	3.4 A MQ é fácil de ligar
3	3.5 A MQ tem uma complexidade baixa
4	3.6 A MQ tem uma interface intuitiva
2	3.8 A MQ ocupa pouco espaço de trabalho
5	4. A MQ é de elevada durabilidade.
3	4.1 A MQ é de elevada qualidade de construção
4	4.2 A MQ tem recipientes de IPA resistentes à degradação pelo IPA
2	4.4 Os componentes da MQ resistem a quedas
5	4.5 Os componentes consumíveis são de fácil e rápida substituição
5	5. A MQ é versátil.
4	5.1 A MQ trata peças com geometrias complexas
5	5.2 A MQ processa várias peças ao mesmo tempo
5	5.3 A MQ permite várias utilizações seguidas
4	6. A MQ é de fácil manutenção.
3	6.1 A MQ filtra o álcool isopropílico
3	6.2 A MQ alerta para a necessidade de trocar o IPA
5	6.3 O recipiente de IPA é removível para fácil despejo
5	7. A MQ é segura de utilizar.
2	7.2 A MQ não tem cantos nem arestas afiadas
2	7.3 A MQ não permite o funcionamento das luzes UV sem a tampa estar fechada
3	7.4 Os motores elétricos da MQ param imediatamente se detetarem alguma resistência, de modo a prevenir que o utilizador se entale.

5.2.5. Refletir nos resultados e no processo

O quinto e final passo, é refletir nos resultados e no processo. Embora o processo de identificar as necessidades dos clientes tenha sido bem estruturado, não é uma ciência exata. Por esta razão, foi essencial neste último passo verificar se os resultados obtidos eram consistentes com o conhecimento e intuição desenvolvida com a interação com clientes.

Após uma revisão de todo o processo verificámos que os resultados obtidos coincidiam com as expectativas dos clientes e do desenvolvimento do produto.

5.3. Especificações do produto

As especificações do produto são descrições precisas do que o produto tem de fazer. Estas especificações são idealmente estabelecidas numa etapa inicial do processo de desenvolvimento e depois procedidas para o design e engenharia do produto para ir de encontro às especificações exatas do produto. No entanto, para produtos relacionados com tecnologia, como é o nosso caso, este cenário é raro. Para estes produtos, as especificações são estabelecidas no mínimo duas vezes. Imediatamente após identificar as necessidades dos clientes, são estabelecidas as especificações alvo. Estas representam as esperanças do produto, mas são estabelecidas antes de se conhecer as limitações tecnológicas que se iram enfrentar em etapas posteriores. Por esta razão as especificações alvo têm de ser redefinidas depois de ser selecionado um conceito final de produto. O estabelecimento de especificações alvo é um processo de quatro passos:

- 1º. – Preparar a lista de métricas.
- 2º. – Realizar uma análise competitiva.
- 3º. – Determinar valores alvo ideais e marginalmente aceitáveis.
- 4º. – Refletir nos resultados e nos processos.

Tabela 5.5: Necessidades dos clientes para a máquina e as suas importâncias relativas.

Nº		Necessidade	Imp.
1	A máquina	realiza a limpeza de pequenos detalhes e orifícios	5
2	A máquina	fornece agitação ao álcool	4
3	A máquina	permite o controlo de saturação sobre o IPA	3
4	A máquina	seca as peças após o banho de IPA	3
5	A máquina	A MQ apenas insere as peças na cura após IPA estar seco da sua superfície	4
6	A máquina	apresenta maior qualidade das peças tratadas	5
7	A máquina	requer o mínimo de interações do utilizador	5
8	A máquina	transfere a peças/s automaticamente do IPA para a cura	4
9	A máquina	é fácil de montar	2
10	A máquina	tem um livro de instruções	4
11	A máquina	requer o mínimo de ferramentas para ser montada	2
12	A máquina	é fácil de ligar	2
13	A máquina	tem uma complexidade baixa	3
14	A máquina	tem uma interface intuitiva	4
15	A máquina	ocupa pouco espaço de trabalho	2
16	A máquina	é de elevada qualidade de construção	3
17	A máquina	tem recipientes de IPA resistentes à degradação pelo IPA	4
18	A máquina	tem componentes resistentes a quedas	2
19	A máquina	componentes consumíveis são de fácil e rápida substituição	5
20	A máquina	trata peças com geometrias complexas	4
21	A máquina	processa várias peças ao mesmo tempo	5
22	A máquina	permite várias utilizações seguidas	5
23	A máquina	filtra o álcool isopropílico	3
24	A máquina	alerta para a necessidade de trocar o IPA	3
25	A máquina	tem recipiente de IPA é removível para fácil despejo	5
26	A máquina	não tem cantos nem arestas afiadas	2
27	A máquina	não permite o funcionamento das luzes UV sem a tampa estar fechada	2
28	A máquina	tem motores elétricos que param imediatamente se detetarem alguma resistência, de modo a prevenir que o utilizador se entale.	3

5.3.1. Preparar a lista de métricas

As métricas mais úteis são aquelas que refletem o mais diretamente possível o grau em que o produto satisfaz as necessidades dos clientes. A relação entre as necessidades e as métricas é fundamental em todo o conceito de especificações. O pressuposto deste trabalho é que a translação das necessidades dos clientes para um conjunto de especificações precisas e mensuráveis seja possível e que ir de encontro a essas especificações irá levar à satisfação das necessidades dos clientes associadas. Uma maneira adequada de gerar a lista de métricas é contemplar as necessidades, uma de cada vez, e considerar qual a característica precisa e mensurável do produto que satisfará as mesmas. No caso ideal, existe apenas uma única métrica para cada necessidade. Na prática, verificámos que isto não foi possível. Uma matriz de necessidades-métricas simples representa a relação entre as necessidades e as métricas como podemos observar na matriz 5.7 utilizando os dados da tabela 5.6. Podemos também observar nesta tabela a importância(Imp.) e as unidades de cada métrica.

Tabela 5.6: Lista de métricas.

NºMétrica	NºNecess.	Métrica	Imp.	Unidade
1	1	Dimensão mínima dos detalhes	5	mm
2	1	Profundidade máxima dos detalhes	5	mm
3	2	Turbulência do líquido	4	k
4	3,24	Saturação do IPA	3	binário
5	4	Tempo de secagem	3	segundos
6	5,6	Aspeto visual	5	binário
7	6	Viscosidade superficial	4	Pa.s
8	7	Número de interações	5	unidade
9	8	Tempo de transferência	4	segundos
10	8	Número de movimentos	5	unidade
11	9	Tempo de montagem	2	minutos
12	10	Instruções de montagem	2	binário
13	11	Ferramentas para montagem	3	lista
14	12	Localização visível do botão ON/OFF	3	binário
15	13	Número de peças	4	número
16	14	Facilidade de utilização	5	subjetivo
17	15	Área ocupada	3	m ²
18	15	Volume ocupado	3	cm ³
19	16	Ciclos até haver falha	5	ciclos
20	17	Rugosidade no interior do tanque de IPA	4	ra
21	18	Altura máxima de queda	2	metros
22	19	Tempo de substituição	1	minutos
23	20	Volume cúbico total livre	4	m ³
24	21	Área da base do cesto	4	m ²
25	22	Número de utilizações até limpeza	2	unidade
26	23	Quantidade de saturação recuperada	3	%
27	25	Recipiente de IPA removível	5	binário
28	26	Sensação tátil	4	binário
29	27	Sensor de pressão	3	binário
30	28	Máxima resistência nos motores	2	corrente

Tabela 5.7: Matriz das necessidades – métricas

Necessidade	Métrica																													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	Limpeza de pequenos detalhes e orifícios	•	•																											
2	Agitação ao álcool		•																											
3	controlo de saturação sobre o IPA			•																										
4	Seca a/s peça/s após a limpeza em IPA				•																									
5	cura a/s peça/s somente após o IPA na sua superfície estar seco					•																								
6	Apresenta maior qualidade das peças tratadas						•																							
7	Requer o mínimo de interações do utilizador							•																						
8	Transfere a/s peça/s automaticamente do IPA para a cura								•	•																				
9	É fácil de montar									•																				
10	Tem livro de instruções										•																			
11	Requer o mínimo de ferramentas para ser montada											•																		
12	É fácil de ligar												•																	
13	Complexidade baixa													•																
14	Interface intuitiva														•															
15	Ocupa pouco espaço de trabalho															•	•													
16	É de elevada qualidade de construção																	•												
17	Tem recipientes de IPA resistentes à degradação pelo IPA																		•											
18	Componentes resistem a quedas																			•										
19	Componentes consumíveis são de fácil e rápida substituição																				•									
20	Trata peça/s de geometrias complexas																					•								
21	Processa várias peças ao mesmo tempo																						•							
22	Permite várias utilizações seguidas																							•						
23	Filtra o IPA																								•					
24	Alerta para a necessidade de trocar o IPA			•																										
25	Recipiente de IPA é removível para fácil despejo																									•				
26	Não tem cantos nem arestas afiadas																										•			
27	Luzes UV apenas funcionam com a tampa fechada																											•		
28	Motores elétricos previnem entalamentos ao detetar resistência																												•	•

Esta matriz é um elemento chave para a casa da qualidade, pois permite-nos visualizar as relações de uma forma mais gráfica. Neste caso, podemos interpretar a informação na matriz mais facilmente do que na lista da tabela 5.6.

5.3.2. Realizar uma análise comparativa

A não ser que seja esperado um monopólio do produto, é essencial determinar o sucesso comercial do produto. Embora o desenvolvimento deste produto tenha começado com algumas ideias de como se deveria diferenciar de produtos existentes, as especificações alvo são a linguagem utilizada para analisar e decidir o posicionamento detalhado do nosso produto em relação a produtos existentes. De momento existem apenas duas empresas que comercializam máquinas com as mesmas funcionalidades sendo que a informação disponibilizada das mesmas é muito pouca. De qualquer forma, as informações disponíveis dos produtos concorrentes foram recolhidas para suportar estas decisões de posicionamento. Esta avaliação comparativa pode ser observada na tabela 5.8. O tempo investido nesta tarefa é essencial, pois sem este tipo de informação o desenvolvimento do produto pode não ter sucesso.

Tabela 5.8: Análise competitiva baseada nas métricas.

Métr.	Necess.	Métrica	Imp.	Unidade	<i>Form wash+Form cure</i>	<i>Prusa curing and washing</i>
1	1	Dimensão mínima dos detalhes	5	mm	N/A	N/A
2	1	Profundidade máxima dos detalhes	5	mm	N/A	N/A
3	2	Turbulência do líquido	4	k	N/A	N/A
4	3, 24	Saturação do IPA	3	binário		
5	4	Tempo de secagem	3	minutos	Ao ar	N/A
6	5, 6	Aspeto visual	5	binário	N/A	N/A
7	6	Viscosidade superficial	4	Pa.s	N/A	N/A
8	7	Número de interações	5	unidade	2	2
9	8	Tempo de transferência	4	segundos	30	90
10	8	Número de movimentos	5	unidade	4	4
11	9	Tempo de montagem	2	minutos	N/A	N/A
12	10	Instruções de montagem	2	binário	sim	sim
13	11	Ferramentas para montagem	3	lista	N/A	N/A
14	12	Localização visível do botão ON/OFF	3	binário	sim	sim
15	13	Número de peças	4	número	3	3
16	14	Facilidade de utilização	5	subjeto	sim	sim
17	15	Área ocupada	3	m^2	0.077+0.069	N/A
18	15	Volume ocupado	3	m^3	0.023+0.026	N/A
19	16	Ciclos até haver falha	5	ciclos	N/A	N/A
20	17	Fricção no interior do tanque de IPA	4	μ	N/A	N/A
21	18	Altura máxima de queda	2	metros	N/A	N/A
22	19	Tempo de substituição	1	minutos	N/A	N/A
23	20	Volume cúbico total livre	4	m^3	1.45 x 1.45 x 1.75	N/A
24	21	Área da base do cesto	4	m^2	1.45 x 1.45	N/A
25	22	Número de utilizações até limpeza	2	unidade	70	N/A
26	23	Quantidade de saturação recuperada	3	%	0	0
27	25	Recipiente de IPA removível	5	binário	sim	sim
28	26	Sensação tátil	4	binário	N/A	N/A
29	27	Sensor de pressão	3	binário	N/A	N/A
30	28	Máxima resistência nos motores	2	corrente	N/A	N/A

5.3.3. Determinar valores alvo ideais e marginalmente aceitáveis

Este passo requer uma sintetização da informação disponível de maneira a definir efetivamente os valores alvo para as métricas. Para tal foram utilizados dois valores de referência, o valor ideal e o valor mínimo aceitável. O primeiro é o melhor resultado que pode ser esperado e o marginalmente aceite é o valor mínimo para o produto ser comercialmente aceite. A tarefa de análise competitiva pode ajudar bastante neste processo pois através da mesma já ficamos com uma ideia de valores de algumas métricas.

Deste modo, temos então cinco maneiras de expressar os valores das métricas:

- Pelo menos x: limite mínimo, quanto maior melhor.
- No máximo x: limite máximo, quanto menor melhor.
- Entre x e y: menos de x e mais do que y.
- Exatamente x: valor exato necessário, deve ser evitado porque implica limitações no design do produto.
- Valores distintos: quando o produto pode ter distintas variações.

Esta avaliação de valores alvo ideais e marginalmente aceitáveis pode ser vista na tabela 5.9. na definição de especificações finais.

5.3.4. Casa da qualidade

Algumas métricas são relacionáveis com mais do que uma métrica e podem também afetar-se mutuamente. Por exemplo, a métrica volume ocupado afeta a métrica volume métrico total livre, que é depois refletido nas necessidades associadas. Podemos concluir assim que este processo é dinâmico e não linear, onde as necessidades e as métricas estão interligadas e afetam-se umas às outras. Por esta razão, antes de avançar com a geração de conceitos, foi utilizado um método para ilustrar a relação entre as necessidades e as métricas. O método utilizado foi a casa da qualidade, que consiste num gráfico técnico utilizado no desdobramento da função qualidade (QFD – *Quality Function Deployment*) [26]. Este método consiste no desenvolvimento de uma matriz que fornece um mapa conceptual para o processo de design do produto, bem como para compreensão das necessidades dos clientes e o estabelecimento de prioridades das especificações finais [27]. Este método é, portanto, baseado no mesmo processo realizado nas secções anteriores, de estabelecer as necessidades e métricas que as refletem.

O gráfico resultante pode ser utilizado como um mapa, onde a relação entre as necessidades e métricas é estabelecida, assim como a relação entre cada métrica. Este método permite calcular o peso relativo de cada métrica, baseado nas necessidades a que estão relacionadas e na importância atribuída a cada uma.

Através deste método é possível apresentar mais características, como a definição de valores alvo para as especificações, definição da dificuldade para obtenção das mesmas ou comparação com produtos existentes para fazer análises competitivas.

Como se pode observar nas tabelas 5.10 e 5.11, os principais blocos da casa da qualidade consistem em duas matrizes- a “estrutura” e o “telhado” da casa. Na estrutura da casa da qualidade é estabelecida uma relação entre as necessidades e as métricas, podendo esta relação ser fraca, moderada ou forte. O “telhado” ilustra a correlação positiva ou negativa entre as métricas. Na parte inferior podemos observar o peso relativo de cada métrica. Este é calculado com base na força da relação que a métrica tem com cada necessidade e com a importância associada dessas necessidades. A relação entre métricas não é refletida e deve ser lida individualmente. Neste trabalho, o método da casa da qualidade foi utilizado com dois objetivos principais. O primeiro foi calcular o peso relativo das métricas e o segundo foi a sua utilização como consulta ao longo de todos os processos de desenvolvimento, pois é um gráfico bastante útil com muita informação disponível. Para o efeito de construção do gráfico foi utilizado um modelo retirado de [28]. As tabelas 5.9, 5.10 e 5.11 representam a legenda, o corpo e o telhado da casa da qualidade.

Tabela 5.9: Legenda da casa da qualidade.

Legenda		
⊖	Relação Forte	9
○	Relação Moderada	3
▲	Relação Fraca	1
++	Correlação Positiva Forte	
+	Correlação Positiva	
-	Correlação Negativa	
▼	Correlação Negativa Forte	
▼	Objetivo É Minimizar	
▲	Objetivo É Máximizar	
x	Objetivo É Valor Alvo	

Tabela 5.10: Corpo da casa da qualidade, relação entre as necessidades e as especificações.

			Coluna #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
			Direção de melhoria Minimizar(▼), Máximizaz(▲), Alvo(X)	▼	▲	▲	▼	▼	×	▼	▼	▼	▼	▼	×	▼	×	▼	▲	×	×	▲	▼	▲	▼	▲	▲	▲	▲	×	×	×	×	
Linha #	Peso relativo	Peso/Importância	Especificações	Necessidades																														
				Dimensão mínima dos detalhes	Profundidade máxima dos detalhes	Turbulência do IPA	Saturação do IPA	Tempo de secagem	Aspecto visual	Viscosidade superficial	Número de interações	Tempo de transferência	Número de movimentos	Tempo de montagem	Instruções de montagem	Ferramentas para montagem	Localização visível do botão ON/OFF	Número de peças	Facilidade de utilização	Área ocupada	Volum ocupado	Ciclos até haver falha	Fricção no interior do recipiente de IPA	Altura máxima de queda	Tempo de substituição	Volume cubico total livre	Área da base do cesto	Número de utilizações até limpeza	Quantidade de saturação recuperada	Recipiente de IPA removível	Sensação tátil	Sensor de pressão	Máxima resistência nos motores	
1	5,1	5	Limpeza de pequenos detalhes e orifícios	0	0	▲																												
2	4,08	4	Agitação do álcool			0																						▲						
3	3,06	3	controlo de saturação sobre o IPA				0																											
4	3,06	3	Seca as peças após limpeza em IPA					0																										
5	4,08	4	Cura as peças somente após o IPA secar						0																									
6	5,1	5	Maior qualidade das peças tratadas						0	0																								
7	5,1	5	Requer o mínimo de interações do utilizador								0																							
8	4,08	4	Transfere as peças automaticamente do IPA para a cura									0	0																					
9	2,04	2	É fácil de montar												0																			
10	4,08	4	Tem livro de instruções													0																		
11	2,04	2	Requer o mínimo de ferramentas para ser montada														0																	
12	2,04	2	É fácil de ligar															0																
13	3,06	3	Complexidade baixa															0																
14	4,08	4	Interface intuitiva																0															
15	2,04	2	Ocupa pouco espaço de trabalho																	0		0												
16	3,06	3	É de elevada qualidade de construção																				0											
17	4,08	4	Tem recipientes de IPA resistentes à degradação																				0											
18	2,04	2	Componentes resistem a quedas																					0										
19	5,1	5	Componentes consumíveis são de fácil e rápida substituição																						0									
20	4,08	4	Trata peças de geometrias complexas	▲	▲																					0		0						
21	5,1	5	Processa várias peças ao mesmo tempo																								0							
22	5,1	5	Permite várias utilizações seguidas																									0						
23	3,06	3	Filtra o IPA																										0					
24	3,06	3	Alerta para a necessidade de trocar o IPA				0																											
25	5,1	5	Recipiente de IPA é removível para fácil despejo																											0				
26	2,04	2	Não tem cantos nem arestas afiadas																													0		
27	2,04	2	Luzes UV apenas funcionam com a tampa fechada																													0		
28	3,06	3	Motores previnem entalamentos ao detectar resistência																														0	
Peso/Importância				49,98	49,98	41,82	55,08	27,54	52,02	45,9	45,9	12,24	36,72	18,36	36,72	18,36	6,12	27,54	36,72	18,36	6,12	27,54	36,72	6,12	45,9	36,72	45,9	45,9	27,54	45,9	18,36	18,36	27,5	
Peso relativo				5,2	5,2	4,3	7,7	2,8	5,4	4,7	4,7	1,4	3,8	1,7	3,8	1,7	0,6	2,8	2,8	1,7	0,7	2,8	3,8	0,6	4,7	3,8	4,7	4,7	2,8	4,7	1,7	1,7	2,8	

Tabela 5.11: Telhado da casa da qualidade, relação entre as especificações.

Linha #	Peso relativo	Peso/Importância	Especificações																														
Necessidades			Coluna #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
				▼	▲	▲	▼	▼	×	▼	▼	▼	▼	▼	×	▼	×	▲	×	×	×	▲	▼	▲	▼	▲	▲	▲	×	×	×	×	
			Dimensão mínima dos detalhes																														
			Profundidade máxima dos detalhes																														
			Turbulência do IPA																														
			Saturação do IPA																														
			Tempo de secagem																														
			Aspecto visual																														
			Viscosidade superficial																														
			Número de interações																														
			Tempo de transferência																														
			Número de movimentos																														
			Tempo de montagem																														
			Instruções de montagem																														
			Ferramentas para montagem																														
			Localização viável do botão ON/OFF																														
			Número de peças																														
			Facilidade de utilização																														
			Área ocupada																														
			Volume ocupado																														
			Ciclos até haver falha																														
			Fricção no interior do recipiente de IPA																														
			Altura máxima de queda																														
			Tempo de substituição																														
			Volume cúbico total livre																														
			Área da base do cesto																														
			Número de utilizações até limpeza																														
			Quantidade de saturação recuperada																														
			Recipiente de IPA removível																														
			Sensação tátil																														
			Sensor de pressão																														
			Máxima resistência nos motores																														

5.3.5. Refletir nos resultados e nos processos

Nesta etapa foi importante fazer uma revisão de todos os processos anteriores que envolveram as especificações do produto de maneira a verificar se os resultados eram consistentes e não haviam impossibilidades na futura realização do desenvolvimento. Uma vez definidos os alvos, deu-se início à geração de conceitos. As especificações alvo foram depois utilizadas para ajudar na seleção do conceito final e ajudaram a verificar se esse conceito era comercialmente viável.

5.3.6. Definir as especificações finais

Depois de ter sido realizada a escolha de um conceito no capítulo seguinte para o posterior processo de design e desenvolvimento, as especificações foram revistas. Houve especificações que originalmente eram apenas valores alvo e que representavam uma vasta gama de valores que neste passo foram aperfeiçoadas e tornadas mais precisas.

Este processo foi simples apesar de ter havido uma certa preocupação com as relações inversas entre várias especificações que eram inerentes no conceito de produto selecionado. Estes *trade-offs* ocorreram principalmente entre métricas de performance técnica diferentes, e entre métricas de performance técnicas e o custo. Uma das partes difíceis do desenvolvimento é exatamente refinar as especificações de maneira a resolver da melhor forma possível os *trade-offs*. Na seguinte tabela podemos observar as especificações finais assim como os seus valores alvo.

Na tabela 5.12 podemos observar também o valor alvo de cada métrica.

Tabela 5.12: Especificações finais

Nº	Métrica	Unidade	Valor alvo
1	Dimensão mínima dos detalhes	mm	0.0500
2	Profundidade máxima dos detalhes	mm	2
3	Turbulência do líquido	k	Não determinado
4	Saturação do IPA	binário	não
5	Tempo de secagem	segundos	330
6	Aspetto visual	binário	sim
7	Viscosidade superficial	Pa·s	0
8	Número de interações	unidade	1
9	Tempo de transferência	segundos	20
10	Número de movimentos	unidade	4
11	Tempo de montagem	minutos	60
12	Instruções de montagem	binário	sim
13	Ferramentas para montagem	lista	Chave sextavada
14	Localização visível do botão ON/OFF	binário	sim
15	Número de peças	número	75
16	Facilidade de utilização	subjetivo	fácil
17	Área ocupada	m^2	0.1300
18	Volume ocupado	m^3	0.0463
19	Ciclos até haver falha	ciclos	10^5
20	rugosidade no interior do recipiente	ra	<0.80
21	Altura máxima de queda	metros	1
22	Tempo de substituição	minutos	<1
23	Volume cúbico total livre	m^3	0.0050
24	Área da base do cesto	m^2	0.0303
25	Número de utilizações até limpeza	unidade	80
26	Quantidade de saturação recuperada	%	100
27	Recipiente de IPA removível	binário	sim
28	Sensação tátil	binário	sim
29	Sensor de pressão	binário	sim
30	Máxima resistência nos motores	corrente	Não determinado

O número de necessidades a que uma métrica está relacionada e a importância dessas necessidades, contribuem para o peso da métrica. Para as métricas que são binárias, as especificações são o cumprimento do design que satisfaz cada métrica.

A dimensão mínima e profundidade dos detalhes foram selecionados de acordo com a espessura de camada mínima que a *FormLabs 1+* consegue imprimir.

A turbulência do IPA foi prevista de acordo com [29], que estuda a turbulência da camada limite de líquido na peça. Não existe, no entanto, forma de calcular valores dada a diferente geometria de cada peça a ser tratada.

A saturação do IPA é controlada através de um dispositivo que indica se o líquido está saturado.

O tempo de secagem do IPA presente na superfície das peças depois de estas saírem do processo de limpeza e de aproximadamente 10 minutos ao ar livre. Ao utilizar ventoinhas pretende-se reduzir este valor para 5 minutos (330 segundos).

O aspeto visual é realizado através de uma inspeção visual na qual pode, ou não, passar o controlo de qualidade.

A viscosidade superficial foi selecionada dadas as características da resina de impressão [30]. O objetivo neste caso é garantirmos que não resta resina não curada na superfície das peças pelo que o valor alvo será de 0 Pa·s (Poise).

O número de interações é a quantidade de vezes que o utilizador tem de interagir com a máquina para o processo completo de limpeza e cura. O objetivo é o utilizador apenas ter de realizar a inserção das peças na máquina pelo que o valor alvo será de 1.

O tempo de transferência é o tempo que as peças demoram a realizar a passagem do recipiente de resina para o recipiente de cura. A duração deste processo irá afetar o tempo total de funcionamento pelo que o objetivo é reduzir este valor tanto o quanto possível, sem que as peças no suporte se movam ou sejam projetadas devido às inércias de arranque e paragem. Visto que o processo de secagem é de 5 minutos e é realizado durante esta transferência o valor objetivo é de 5 minutos e 30 segundos, em apenas 30 segundos são efetivamente para a transferência.

O número de movimento determina a quantidade mínima de movimentos que a máquina faz para concluir o processo total. O valor alvo neste caso é de 4.

O tempo de montagem da máquina pretende-se que seja no máximo de 60 minutos.

Para montar a máquina pretende-se que seja necessária apenas uma ferramenta, neste caso uma chave sextavada.

Para o número total de peças da máquina pretende-se ter a menor quantidade possível sem prejudicar a funcionalidade da mesma. Uma quantidade de peças reduzida facilita o tempo, dificuldade e complexidade da montagem.

De acordo com o estudo de mercado efetuado as dimensões da máquina (área e volume) deveriam ser semelhantes às de uma impressora como a FormLabs 1+.

Para garantir a durabilidade e fiabilidade foi definido um valor alvo de ciclos até haver falha de 10^5 de acordo com [31].

A rugosidade no interior dos recipientes causada pelo desgaste do IPA nos mesmo pretende-se que seja inferior a 0.8 Ra de acordo com [32].

A altura máxima de queda sem danificar a máquina terá de ser no mínimo da altura média de uma mesa de escritório que é aproximadamente 0.75 metros, pelo que será definido o valor de 1 metro para a altura máxima de queda.

O valor alvo do volume total livre dentro do recipiente e da área do cesto foi definido de acordo com as dimensões máximas de impressão da *FormLabs 1+*.

Pretende-se que a máquina possa realizar no mínimo 80 de utilização sem que seja necessário substituir o IPA.

As restantes métricas são binárias pelo que o sucesso de atingir os valores alvos estará no correto design da máquina e escolha de componentes.

5.4. Geração de conceitos

Um conceito de produto é uma descrição da tecnologia, princípios funcionais, e forma do produto. É, portanto, uma descrição precisa de como o produto vai satisfazer as necessidades dos clientes. Normalmente, um conceito é apresentado como um esboço ou como um modelo tridimensional, frequentemente acompanhados de um curto texto que os descreva. O grau de satisfação dos clientes e o sucesso comercial do produto depende em grande parte na qualidade do conceito subjacente.

O processo de geração de conceitos começou através de uma análise do conjunto de necessidades dos clientes e especificações alvo levando assim a um conjunto de conceitos dos quais no foi escolhido apenas um. Este processo encontra-se representado na Figura 5.1.

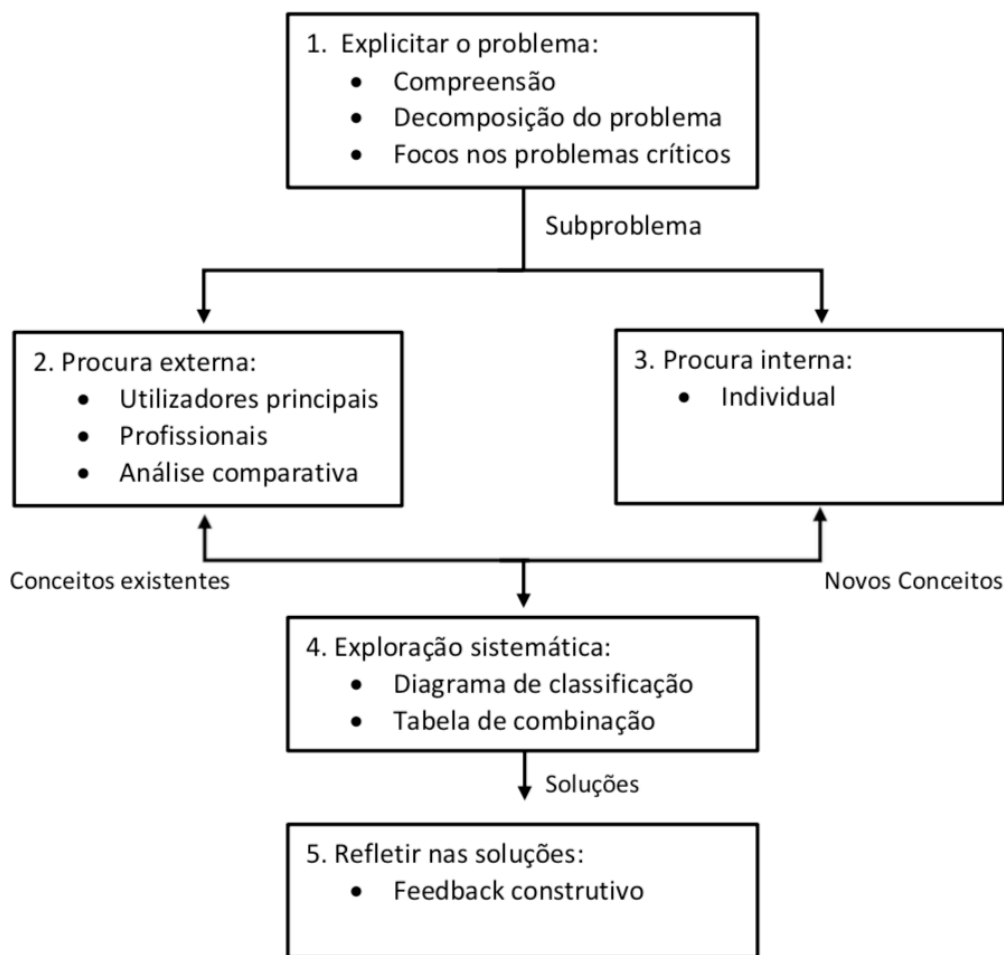


Figura 5.1: Etapas da geração de conceitos

Utilizando a metodologia descrita em [6] para a geração de conceitos no desenvolvimento de produtos, foi realizada uma pesquisa externa de forma a observar os produtos existentes no mercado. Esta procura externa já foi

utilizada no capítulo anterior para realizar a análise competitiva bem como um estudo de mercado abordando para o efeito utilizadores profissionais e amadores. À data de Janeiro de 2019 existem apenas duas empresas que comercializam máquinas com funcionalidades semelhantes às da máquina desenvolvida nesta dissertação. As Figuras 5.2 e 5.3 [33] ilustram as máquinas existentes dessas empresas.



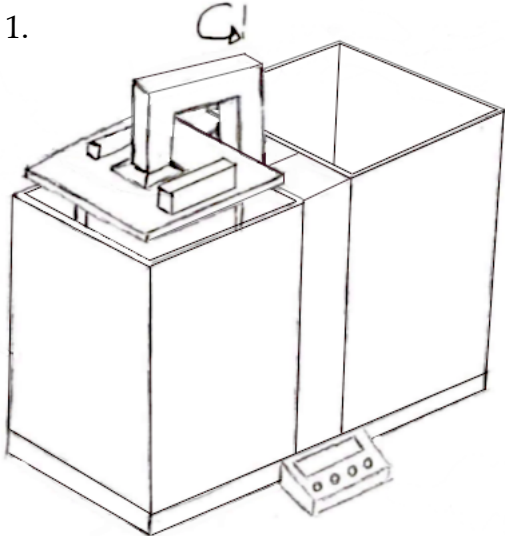
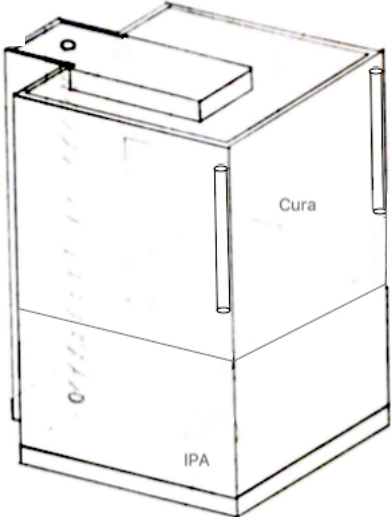
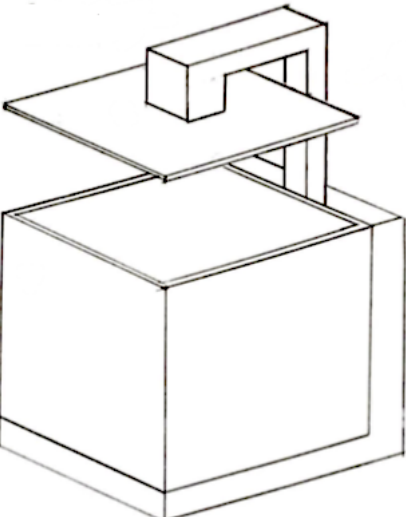
Figura 5.2: FormLabs Wash&Cure.

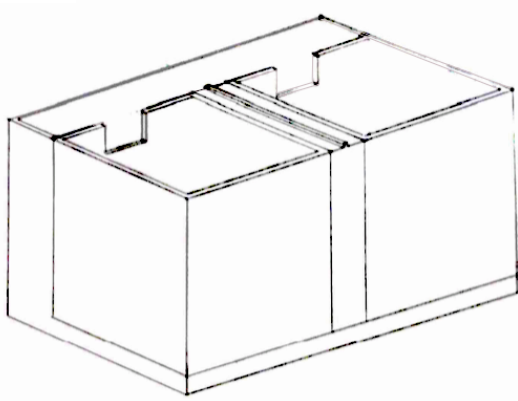
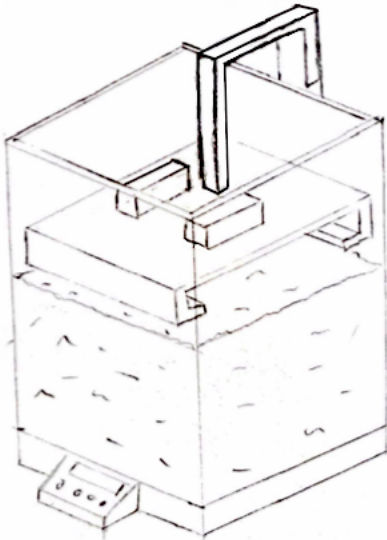
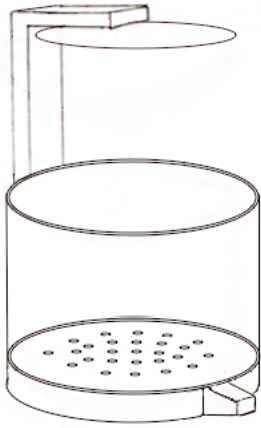


Figura 5.3: Original Prusa Curing and Washing Machine.

Ao tomar em conta as necessidades e os constrangimentos identificados para o produto, foram desenvolvidos alguns conceitos. Para este processo, a casa da qualidade estudada no capítulo anterior demonstrou ser uma ferramenta bastante útil para aplicar a informação obtida na geração de conceitos. Os conceitos gerados estão representados nas seguintes figuras (tabela 5.13):

Tabela 5.13: Conceitos gerados.

<p>1.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza e cura • Braço rotativo • 2 recipientes • Motores de vibração para realizar a limpeza • Lâmpadas UV para realizar a cura. • Suporte para mesa de impressão ou cesto
<p>2.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza e cura • Braço de movimento linear vertical • 1 recipiente • Agitação magnética para realizar a limpeza • Lâmpadas UV para realizar a cura.
<p>3.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza ou cura • 1 recipiente • Tampa no próprio braço • Agitação magnética para realizar a limpeza • Lâmpadas UV para realizar a cura. • Suporte para mesa de impressão ou cesto

<p>4.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza e cura • Braço de movimento linear vertical e horizontal • Tampas elétricas • 2 recipientes • Motores de vibração, agitação ultrassônica ou magnética para realizar a limpeza • Lâmpadas UV para realizar a cura.
<p>5.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza ou cura • 1 recipiente • Tampa mecânica ou no próprio braço • Agitação magnética para realizar a limpeza • Lâmpadas UV para realizar a cura. • Suporte para mesa de impressão
<p>6.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Limpeza ou cura • 1 recipiente • Agitação por bolhas de ar para realizar a limpeza • Lâmpadas UV para realizar a cura. • Suporte para cesto

Com o desenvolvimento de conceitos e ideias foram aparecendo algumas características comuns a vários. Por essa razão, optou-se por organizar os diferentes conceitos em diferentes grupos, sendo que cada um tinha uma ou um conjunto de características em comum. Houve até algumas características que são comuns a todos os conceitos, pelo que estas não foram representadas nos esboços, como é o caso do controlador. É importante também tentar todas as combinações possíveis para poder gerar o maior número de combinações possíveis. Houveram algumas combinações que pelo seu compromisso técnico com os subproblemas foram imediatamente excluídas, fazendo com que conceitos inúteis derivados dessas combinações não fossem exploradas e poupando assim tempo e trabalho. No processo de decomposição do problema sugerido na Figura 5.1, foi importante identificar os subproblemas críticos. Alguns destes subproblemas relevantes identificados são explicados nos próximos capítulos.

5.4.1. Método de agitação do IPA

Como podemos observar na tabela das necessidades (tabela 5.5), uma das necessidades mais importantes, se não a mais importante, é a de realizar a limpeza eficaz das peças tratadas. Para tal é de extrema importância selecionar o método de agitação do IPA que melhor limpa as peças de maneira a não restar resina não curada nas peças antes de estas prosseguirem para a cura. Por esta razão foram geradas ideias de como seria possível fazer a agitação do IPA, das quais foram selecionadas as três ideias mais promissoras, representadas na tabela 5.14. Qualquer uma destas tecnologias pode ser adaptada aos conceitos apresentados na tabela de conceitos anteriormente apresentada.

Tabela 5.14: Opções de agitação do IPA, [34].

1) Agitação Ultrassônica	2) Vibração	3) Agitação Magnética
		

A primeira opção é utilizar tecnologia de agitação ultrassônica. A principal vantagem desta tecnologia é o poder de limpeza/agitação do líquido, que se não for bem dimensionado pode até deixar as peças inutilizáveis. Este sistema é também silencioso, mas tem como desvantagem a complexidade de instalação e

a quantidade de energia e componentes necessários para o seu funcionamento. Este método de agitação é também o mais dispendioso e o que requer mais espaço de instalação.

A segunda opção é utilizar tecnologia de vibração. Os motores de vibração têm a vantagem de serem de baixo custo e de fácil instalação. Estes motores têm também dimensões reduzidas e são relativamente silenciosos. A desvantagem óbvia deste sistema é a vibração que transmite ao resto da máquina que pode provocar desgaste prematuro a certos componentes, folgas e desaperto de ligações aparafusadas.

A terceira opção é utilizar tecnologia de agitação magnética. A agitação magnética é fornece movimento ao álcool isopropílico ao contrário da vibração e da limpeza ultrassónica que apenas fornecem agitação sem movimentação do líquido. A vantagem deste método é que surge um vórtice no recipiente derivado do movimento circular do agitador que por sua vez vai ajudar na separação da resina não curada no interior do líquido [35]. A óbvia desvantagem é que a agitação magnética fornece um aquecimento não controlável ao IPA, o que é um aspeto bastante negativo dada a volatilidade do mesmo. Apesar de o sistema não ser tão complexo como o de agitação ultrassónica, o método de instalação é igualmente complicado pois em ambos existe o problema de o recipiente de IPA ser removível o que torna a comunicação entre estes aparelhos e o recipiente mais complicada.

Para escolher entre estas três opções houve então a necessidade de as avaliar utilizando diferentes critérios como podemos observar na tabela abaixo (tabela 5.15). Para tal foi realizada uma análise simples de conceitos onde cada opção obteve uma pontuação e uma posição. Para realizar esta avaliação foi utilizada uma escala de 1 a 4 para avaliar cada parâmetro.

Tabela 5.15: Análise de conceitos para seleção da opção de agitação do IPA.

Critério de seleção	Opção 1	Opção 2	Opção 3
Eficácia de limpeza	4	3	3
Facilidade de instalação	1	4	2
Ruído sonoro	3	2	4
Espaço requerido	1	4	3
Custo	1	4	2
Segurança	2	4	1
Pontuação	12	21	15
Classificação	3º	1º	2º




Pela análise efetuada podemos concluir que a melhor opção seria utilizar a agitação por vibração (opção 2), na qual os motores de vibração seriam instalados no braço de suporte do cesto e mesa de impressão. A primeira opção foi considerada a pior opção principalmente devido à sua elevada dimensão e complexidade de instalação, sendo que o custo também teve a sua influência. A

terceira opção apresentou problemas principalmente no que toca à segurança e à facilidade de instalação.

5.4.2. Método de cura

Depois de serem limpas no recipiente com IPA, as peças são transferidas para o recipiente de cura para serem curadas completamente antes estarem prontas a ser utilizadas e manejadas sem luvas. Para as peças curarem é necessário estarem expostas a radiação ultravioleta (UV). A luz natural do sol e das próprias luzes artificiais presentes em qualquer divisão é suficiente para curar uma peça, mas demora cerca de 24 horas para curar totalmente a peça, o que torna esta opção pouco viável. Por esta razão é comum recorrer a lâmpadas ultravioletas (tabela 5.16) para acelerar este processo de cura, sendo que através destas o tempo de cura pode ser reduzido para apenas uma hora.

Tabela 5.16: Opções de lâmpadas ultravioleta, [34].

1) LED	2) Lâmpada LED	3) Lâmpada quartzo
		

No que toca à seleção das lâmpadas a utilizar não existe muito por onde escolher, sendo que a eficácia das mesmas é semelhante variando apenas a potência, tamanho e aquecimento. De qualquer maneira, à semelhança da escolha do método de agitação, foi realizada uma análise simples de conceitos mas neste caso foi utilizada uma escala de apenas de 1 a 3 para avaliar cada parâmetro. É possível observar esta análise na tabela abaixo (tabela 5.17).

Tabela 5.17: Análise de conceitos para seleção da opção de cura.

Critério de seleção (Potência)	Opção 1 (10-100 Watt)	Opção 2 (3-5 Watt)	Opção 3 (8-40 Watt)
Eficácia de cura	3	1	2
Facilidade de instalação	3	3	3
Espaço requerido	3	1	2
Durabilidade	3	3	2
Consumo energético	2	3	2
Custo	2	3	2
Pontuação	18	14	13
Classificação	1º	2º	3º

Pela análise efetuada podemos concluir que a melhor opção seria realizar a cura das peças com luzes LED de maior potência (opção 1). Estas têm a grande vantagem de ocuparem pouco espaço o que faz com que seja necessário menos espaço dentro do recipiente de cura e consequentemente toda a máquina irá ocupar menos espaço, e são também as que melhor curam as peças dada a sua potência relativamente às outras lâmpadas. A opção 2, apesar de ter um custo e consumo energético mais reduzido, tem pouca potência e requer bastante espaço para a sua instalação pelo pode ser facilmente descartada por esta razão. Como seria de esperar, a terceira opção perde para as luzes LED em quase todos os aspetos, sendo que o único aspeto vantajoso destas lâmpadas é aquecerem mais do que os LED's, o que é vantajoso no processo de cura das peças mas não é essencial.

5.5. Seleção de conceito

A melhor forma de garantir uma escolha acertada na seleção do conceito mais promissor é utilizar uma matriz de análise semelhante à utilizada no capítulo anterior para selecionar a tecnologia de agitação e as lâmpadas de cura. Esta matriz permite também avaliar os pontos mais fortes de cada opção. A convergência de conceitos resultantes deste processo permite testar as limitações de modo a serem validadas e ajustadas se necessário. A casa da qualidade pode também ser uma ferramenta importante para identificar aspetos a serem melhorados.

Ao realizar esta análise foi utilizada uma matriz de Pugh [36], representada abaixo na tabela 5.18. As entradas desta matriz foram os conceitos nas linhas e as necessidades nas colunas. Algumas das necessidades apresentadas anteriormente não constam nesta análise pois são iguais para todos os conceitos pelo que não iriam afetar o desempenho de nenhum deles. Por exemplo, a necessidade de a máquina fornecer agitação ao IPA não muda de conceito para conceito.

Tabela 5.18: Matriz de Pugh para seleção do conceito.

Necessidade/critério	Importância	Conceito 1	Conceito 2	Conceito 3	Conceito 4	Conceito 5	Conceito 6	Conceito 7	Conceito 8
Lava e cura as peças	5	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
Seca as peças após limpeza	3	-1	-1	-1	+1	-1	0	0	-1
Requer o mínimo de interações	5	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1
Transfere as peças do IPA para a cura	4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	0	-1
É fácil de montar	2	0	0	+1	0	+1	0	+1	0
Complexidade baixa	3	0	0	+1	0	+1	0	0	+1
Ocupa pouco espaço de trabalho	2	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1
Componentes são de fácil substituição	5	0	0	+1	0	+1	+1	0	0
Recipiente de IPA é removível	5	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
Segurança	5	-1	-1	0	+1	-1	0	+1	+1
Custo	4	-1	0	+1	-1	+1	+1	-1	0
Total +		4	4	7	7	7	5	4	4
Total -		4	3	3	2	4	2	3	4
Total global		0	1	4	5	3	3	1	0
Total composto		5	3	14	21	9	12	0	-2

Para contruir a tabela anterior, cada conceito foi avaliado em relação a cada necessidade/critério, sendo atribuídos os valores +1, 0 e -1. O valor +1 para descrever uma relação positiva, 0 para uma relação neutra e -1 para uma relação negativa. Nas últimas linhas da tabela obtemos a soma de pontos positivos e negativos de conceitos que é utilizada para obter o total global que é a diferença destas duas somas. Para calcular o total composto basta multiplicar a pontuação da necessidade de cada conceito pela importância da mesma, e depois somar os valores obtidos.

Através desta análise foi possível concluir que o conceito mais promissor é o conceito 4. As vantagens deste conceito sobre os outros estão principalmente na passagem das peças de um recipiente para o outro, a sua secagem durante a passagem e na segurança. O Conceito 3 também seria promissor se apenas fosse necessário realizar a limpeza das peças sem posteriormente fazer a cura. Com o conceito selecionado e os passos anteriores verificados pode-se então dar início à construção do conceito.

5.6. Construção do conceito

Após selecionado o conceito no capítulo anterior, deu-se início à construção do mesmo. Em primeiro lugar foi realizada a modelação do conceito em CAD no software *SolidWorks 2018*. Neste processo foi necessário desenhar todas as peças necessárias ao funcionamento correto da máquina. Algumas peças de maior complexidade, como os motores passo a passo, ventoinhas e polias foram retirados de uma base de dados de desenhos CAD visto serem elementos com medidas predefinidas que seriam depois comprados. A base de dados de desenhos CAD utilizada foi o website *grabcad.com*. Durante a modelação em CAD foi impresso o mecanismo principal da máquina à escala de 1:2 para realizar uma prova de conceito e examinação visual. Após terminada a modelação em CAD procedeu-se então à construção do protótipo em escala real sendo este depois testado para verificar a sua viabilidade e correto funcionamento. Nesta parte do desenvolvimento da máquina foi apenas realizada a prova de conceito através do protótipo pelo que os componentes eletrónicos que controlam a máquina, nomeadamente o Arduino, cablagem elétrica e sensores, não constam no conceito 3D apesar de se ter deixado o espaço adequado para a instalação dos mesmos. Na seguinte figura podemos observar o fluxograma simplificado relativo ao desenvolvimento da máquina desde a modelação em CAD até ao protótipo final.

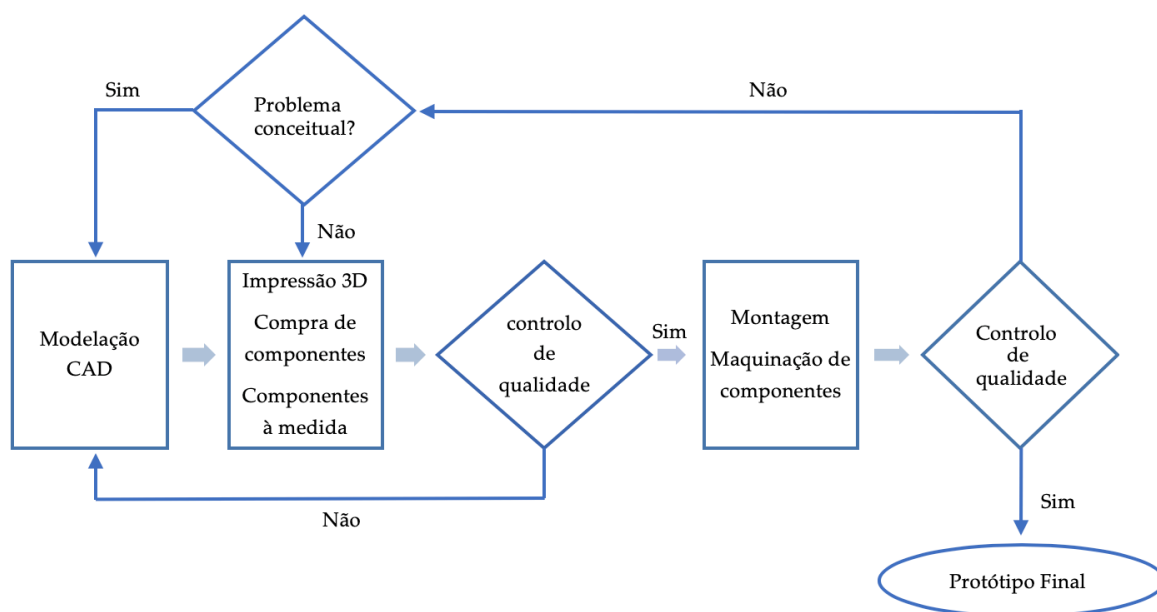


Figura 5.4: Ciclo de construção simplificado da máquina.

5.6.1. Modelação CAD

Nesta fase toda a máquina foi modelada em CAD com exceção dos componentes eletrónicos. Esta etapa foi uma das mais importantes pois permitiu passar o que eram apenas ideias conceptuais para modelos precisos com dimensões reais. Para definir as dimensões da máquina começámos por verificar qual a dimensão máxima das peças impressas da máquina de impressão 3D *FormLabs 1+*. Sendo que a dimensão máxima destas seria de 125x125x165 mm, começámos por modelar os recipientes, tanto de limpeza como de cura para poderem albergar peças com esta dimensão. Para tal os recipientes teriam de ter espaço suficiente para as peças, o cesto que para as suportar e ainda uma folga de espaço entre o cesto e as paredes dos recipientes, sendo que no recipiente de cura esta folga teve de ser de cerca de 10 mm dada a espessura dos LED's ultravioleta. Tomando todos estes fatores em conta optou-se por definir as dimensões interiores dos dois recipientes em 190x190x240 mm. Apesar de o recipiente de limpeza requerer menos espaço interior do que o recipiente de cura, as dimensões são iguais nos dois tanto por uma questão de simplicidade de construção e fabricação como por uma questão de simetria estética. Para fins de prototipagem o material selecionado para estes recipientes foi o vidro acrílico com espessura de 5 mm. Na seguinte figura (Fig. 5.5) podemos observar uma ilustração dos recipientes. Alguns dos componentes modelados em CAD serão apresentados no corpo do documento como imagens processadas e posteriormente apresentadas em maior detalhe no anexo D deste documento.

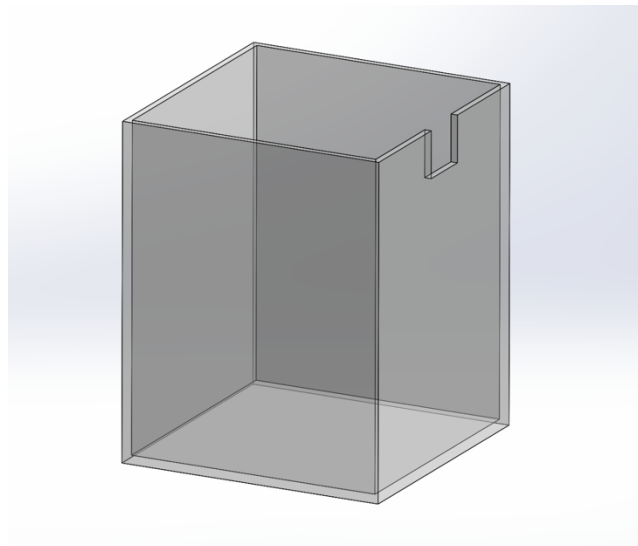


Figura 5.5: Ilustração em CAD de um recipiente.

Depois de definidas as dimensões dos recipientes, o passo seguinte foi modelar o mecanismo principal da máquina que controla todo o movimento das peças a tratar. De acordo com o conceito selecionado foi necessário desenhar um mecanismo que permitisse transferir as peças de um recipiente para o outro. Para realizar este movimento optou-se por desenhar um mecanismo que requeresse o mínimo de movimentos necessários, fosse de dimensões reduzidas e funcionasse apenas em duas direções para não aumentar a complexidade de funcionamento da máquina e consequentemente o seu custo.

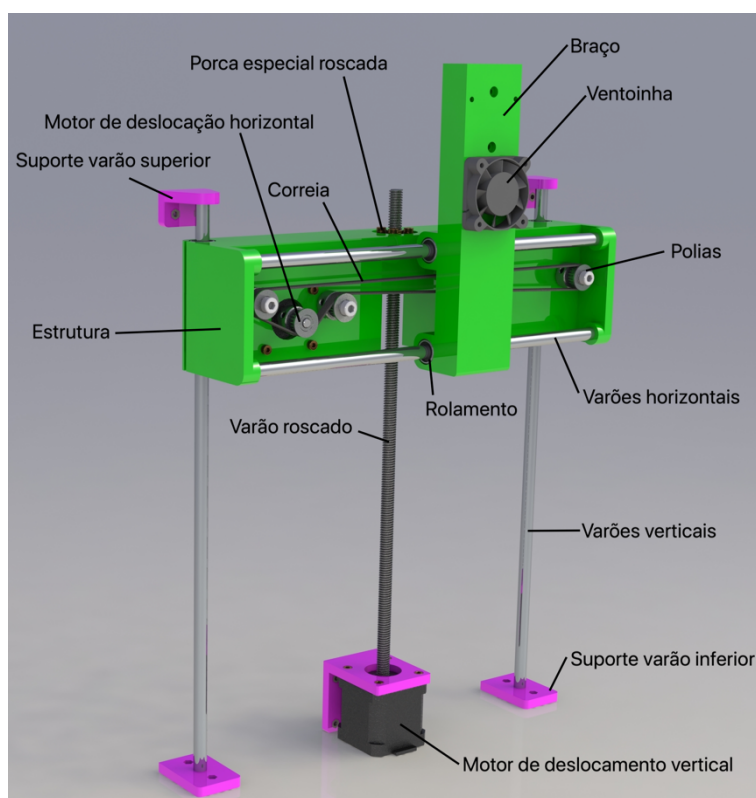


Figura 5.6: Ilustração do mecanismo principal em CAD com legenda dos componentes.

Na figura anterior podemos observar o mecanismo desenvolvido, com a legenda de cada componente de modo a facilitar a leitura e interpretação deste capítulo.

O primeiro passo na projeção deste mecanismo foi desenhar a sua estrutura, tendo em consideração todos os componentes inerentes ao funcionamento deste. O maior desafio neste passo foi desenhar esta mesma estrutura de modo a albergar todos os componentes com a menor área possível, sem comprometer a sua integridade estrutural tendo em conta que esta peça seria futuramente impressa numa impressora 3D em plástico PLA para efeitos de prototipagem. Depois de vários esboços realizou-se a modelação em CAD da estrutura do mecanismo principal mais promissora. Como dito anteriormente, esta tarefa foi bastante desafiante pelo nível de atenção ao detalhe necessário, mais precisamente ao dimensionamento, medição de dimensões de componentes

comprados, folgas, otimização de espaço, encaixe de peças e facilidade de montagem. Esta estrutura contém todo o mecanismo de deslocação horizontal e ainda rolamentos e uma porca de fuso trapezoidal para permitir a sua deslocação na direção vertical. Na seguinte figura (figura 5.7) podemos observar a modelação CAD final desta peça.

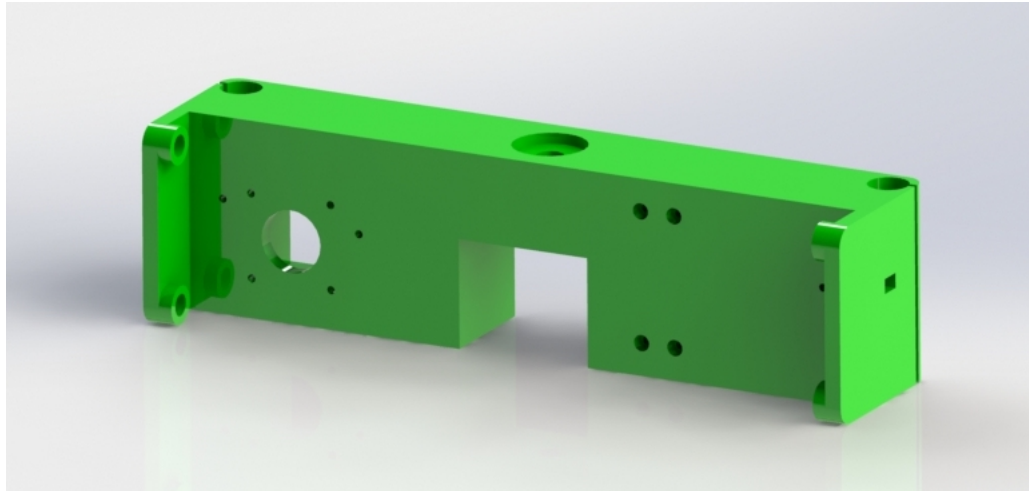


Figura 5.7: Ilustração da estrutura do mecanismo principal da máquina em CAD.

Nesta peça estarão acopladas os seguintes componentes:

- Motor passo a passo – responsável por fornecer o movimento horizontal;
- Polia de tração – acoplada ao motor e responsável por fornecer movimento à correia;
- Polias de orientação – responsáveis por orientar a correia em todo o seu movimento;
- Varões de aço inox – elementos de ligação entre esta estrutura e a estrutura do braço;
- Rolamentos – responsáveis por orientar a estrutura pelos varões durante o movimento vertical;
- Porca roscada especial – responsável por transferir o movimento do fuso trapezoidal à estrutura para o deslocamento vertical.
- Diversos parafusos e porcas – responsáveis por manter todos os componentes apertados e no sítio correto.

Em seguida procedeu-se à modelação do braço, que é efetivamente o componente que suporta as peças. Como já foi dito anteriormente, para efeitos de prototipagem, bastantes peças foram impressas em 3D como é o caso deste componente, o que levou à necessidade de dividir este em duas partes devido

às dimensões excessivas em relação à capacidade de impressão das impressoras disponíveis durante a construção deste protótipo. A função do braço é suportar as peças a tratar, quer estejam elas ainda na mesa de impressão ou no cesto. Foi necessário adaptar o design de modo a ser possível encaixar uma mesa de impressão da FormLabs 1+, um cesto para peças já retiradas da mesa de impressão ou os dois anteriores ao mesmo tempo caso o utilizador assim o deseje. Uma das vantagens de utilizar a máquina com a mesa de impressão e o cesto ao mesmo tempo é assegurar que caso uma peça se desprenda da mesa de impressão durante a limpeza, esta continue a ser tratada ao cair no cesto. O braço está interligado ao resto da máquina por dois rolamentos que o guiam pelos varões horizontais e ainda pela correia que transfere a deslocação horizontal ao braço. Ao braço, estão ainda acoplados os motores de vibração para fornecer vibração ao mesmo que por sua vez, faz vibrar a mesa de impressão e as peças, e ainda duas ventoinhas para realizar a secagem das peças depois de estas saírem do recipiente de IPA. As ventoinhas neste caso servem para acelerar o processo de secagem, pois apesar de não serem essenciais, reduzem o tempo de secagem em alguns minutos e a sua instalação é simples e não requer adaptações do design do braço. Nas seguintes figuras (Fig. 5.8 e Fig. 5.9) podemos observar as duas partes que constituem o braço.



Figura 5.8: Parte inferior do braço.

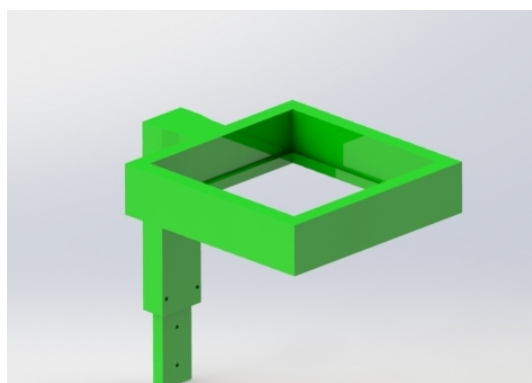


Figura 5.9: Parte superior do braço.

Foram ainda modelados os varões, suportes dos varões e o suporte do motor responsável pelo deslocamento vertical. Estas peças são o elemento de ligação

entre a caixa exterior e o mecanismo principal da máquina pelo que foi necessário ter atenção às suas dimensões pois são estas que definem o atravancamento da estrutura. Na seguinte figura (Fig. 5.10) podemos observar estas peças.

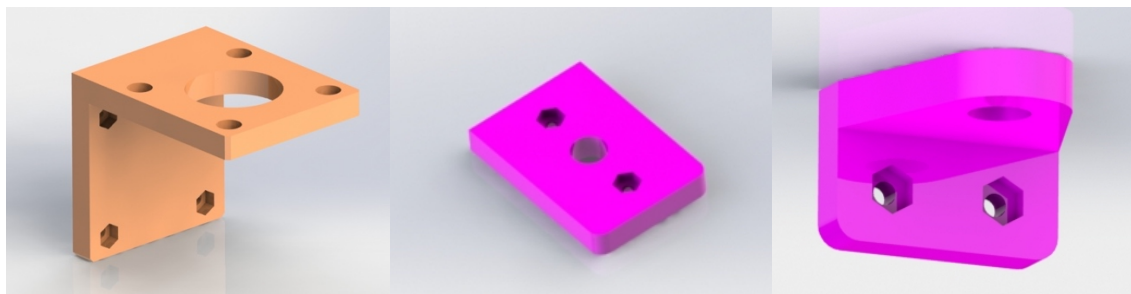


Figura 5.10: Suporte, do motor central, superior e inferior dos varões, respectivamente.

O resto dos componentes acoplados tanto à estrutura como ao braço não foram modelados em CAD pois são componentes pré existentes, tendo sido retirados de uma base de dados de modelos CAD com as dimensões exatas dada a sua importância durante a modelação dos restantes componentes. Foi através destes componentes que foi possível retirar as medidas para os furos, espaçamentos e relações geométricas futuras. Todos os componentes adquiridos podem ser observados no anexo B.

Em seguida procedeu-se à modelação da caixa exterior da máquina. Esta foi dimensionada de acordo com o conceito selecionado na seleção de conceitos no capítulo 5.5. Foi necessário deixar espaço suficiente para a instalação do mecanismo principal e do sistema elétrico que controla a máquina. Na seguinte figura (Fig. 5.11) podemos observar o resultado da modelação da caixa exterior.

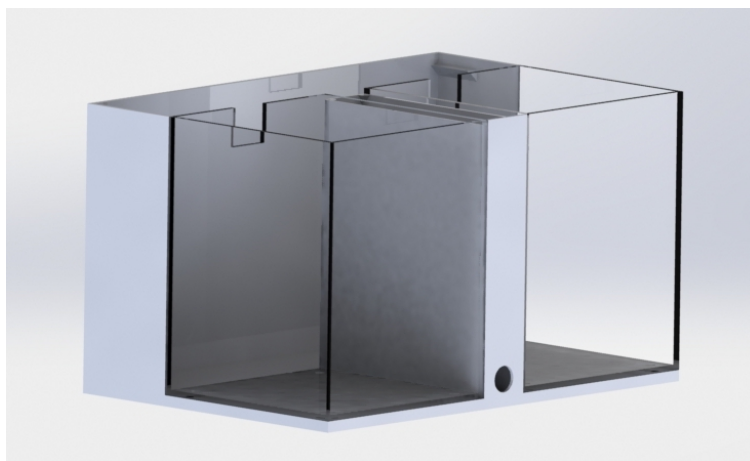


Figura 5.11: Caixa exterior da máquina, com os recipientes inseridos.

Ao observar a figura anterior em detalhe podemos ver que o espaço adaptado para o mecanismo (câmara do mecanismo) fica na parte posterior da máquina sendo que a parte da frente da máquina é o lado onde ambos os recipientes são visíveis. Foi ainda adaptado espaço para a instalação dos componentes elétricos e placas de circuitos (câmara elétrica), entre os dois recipientes como podemos observar na figura. O furo na parte inferior da camara elétrica serve para passar os fios desde as placas de circuito até ao exterior, onde vai estar instalado o ecrã de controlo da máquina.

Após realizar a montagem dos componentes já modelados foi detetado um problema concetrolotual que afetava a altura máxima das peças tratadas. No início foi definido que a altura máxima das peças seria de 165 mm pelo que o deslocamento da estrutura do mecanismo principal teria de ser igual ou superior a esse valor. Neste caso, o deslocamento vertical (Fig. 5.12) máximo disponível não era suficiente, sendo que o problema que seria detetado no futuro seria a impossibilidade de transferir as peças de um recipiente para o outro caso as peças tivessem a altura máxima ou fosse utilizada a máquina com o cesto inserido.

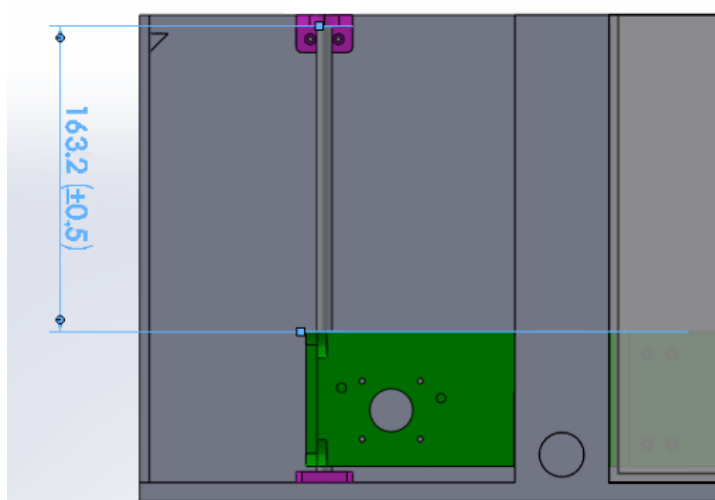


Figura 5.12: Deslocamento vertical máximo do mecanismo principal (em milímetros).

Para resolver este problema a caixa exterior da máquina foi redesenhada de modo a permitir uma deslocação vertical superior à altura máxima do conjunto acoplado do cesto, e ainda com uma margem de 10 milímetros entre o cesto e o fundo do recipiente para permitir a acumulação da resina não curada proveniente das peças tratadas sem que esta entre em contacto com novas peças. Esta alteração na caixa exterior teve como consequência um aumento substancial na altura total da máquina como podemos observar na seguinte figura (Fig. 5.13).

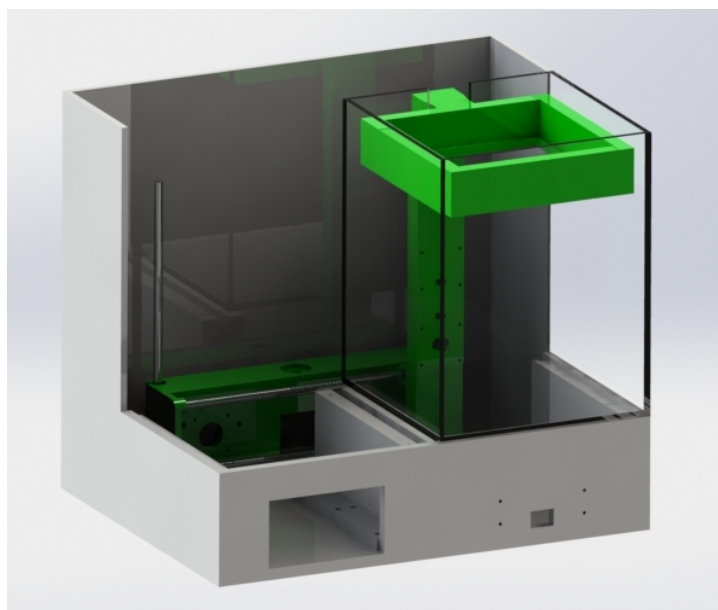


Figura 5.13: Caixa exterior redesenhada com o mecanismo e um dos recipientes.

No entanto, este aumento de altura resultou numa diminuição da largura total da máquina ao retirar a necessidade de ter a câmara elétrica entre os dois recipientes. Para os dois recipientes não estarem em contacto foi feita uma separação simples com uma placa lisa com suportes por baixo dos recipientes. Esta “nova” caixa exterior permitiu passar os componentes elétricos para baixo dos recipientes e permitiu também criar uma gaveta de arrumação (abertura no lado esquerdo). Mais tarde na montagem notou-se que esta alteração trouxe grandes vantagens pois com o design original não teria sido possível instalar todos os componentes elétricos corretamente. A abertura e furos do lado direito da caixa são para passar os fios do controlador e para suportar a caixa do mesmo, respetivamente.

Dadas as grandes dimensões da caixa exterior, esta foi dividida em vários componentes. Os componentes de maior dimensão e menor complexidade, como é o caso de superfícies lisas sem aberturas, foram modeladas de modo a serem fabricadas através do corte de placas. Os restantes componentes seriam impressos através de MA. Nas seguintes figuras (Fig. 5.14, 5.15 e 5.16) podemos observar os componentes que constituem a caixa exterior.

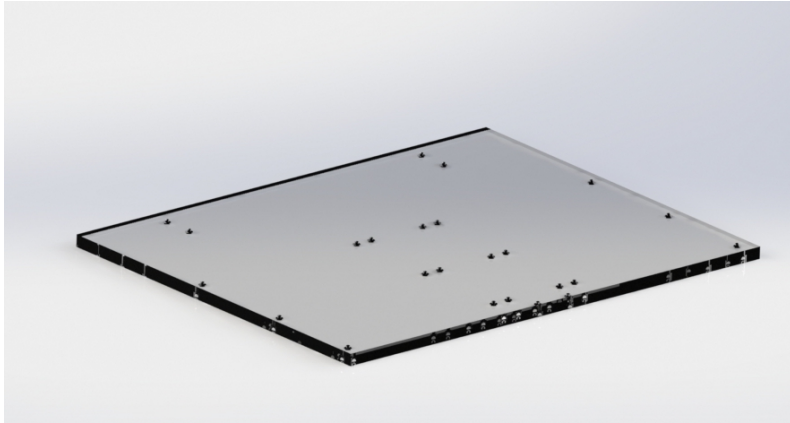


Figura 5.14: Placa inferior (base)

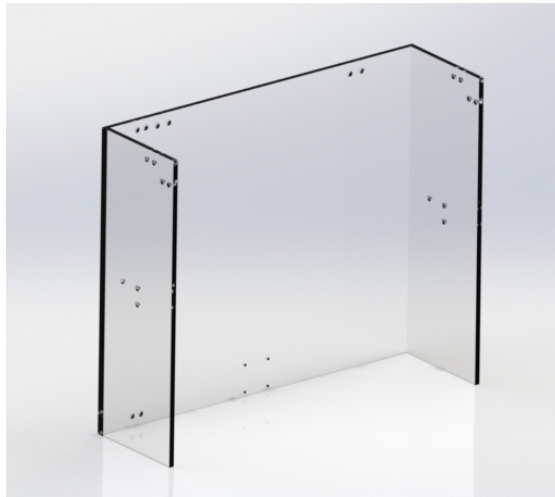


Figura 5.15: Placa traseira

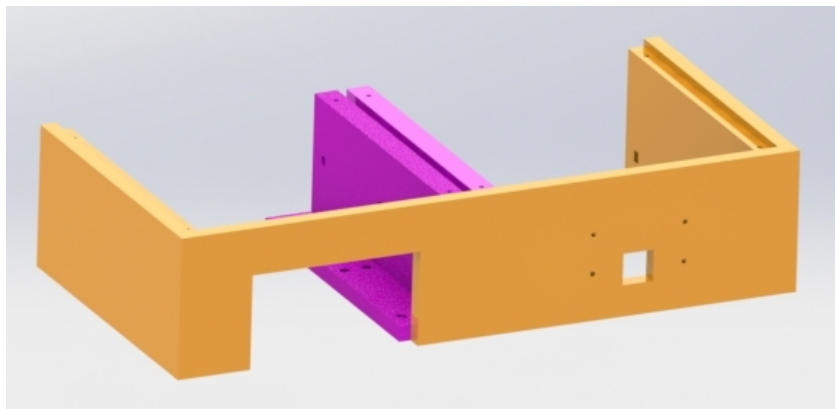


Figura 5.16: Parte frontal da caixa exterior (4 peças)

Na figura 5.16 podem ser observados três peças distintas, mas mais uma vez, como a peça a cor-de-laranja é demasiado grande para ser fabricada por MA de uma só vez, esta teve de ser dividida em duas partes e por essa razão optou-se por incluir a informação de que são quatro peças na figura. É de notar que estas peças poderiam ser fabricadas mais eficientemente por outros processos de fabrico, como por exemplo, injeção de polímeros, mas para efeitos de prototipagem optou-se por imprimir as peças em 3D dada a maior rapidez e custo de produção quando se trata apenas de uma unidade.

Para terminar a caixa exterior da máquina, modelou-se os componentes em falta que incluem a gaveta, a cobertura do controlador eletrónico, as tampas para cobrir as peças na figura 5.16 e ainda as tampas dos recipientes. As tampas dos recipientes seriam fabricadas por corte de placas e os restantes componentes por MA. Nas seguintes figuras (Fig. 5.17 e 5.18) podemos observar o resultado da modelação de alguns destes componentes assim como uma ilustração do conjunto já modelado (Fig. 5.19).

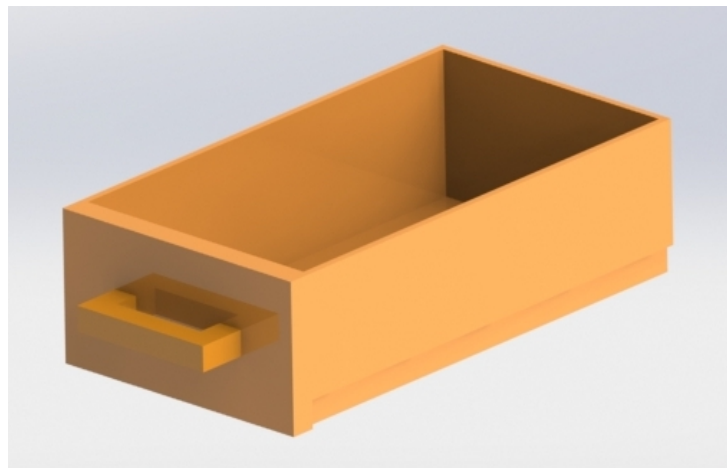


Figura 5.17: Gaveta de arrumação.

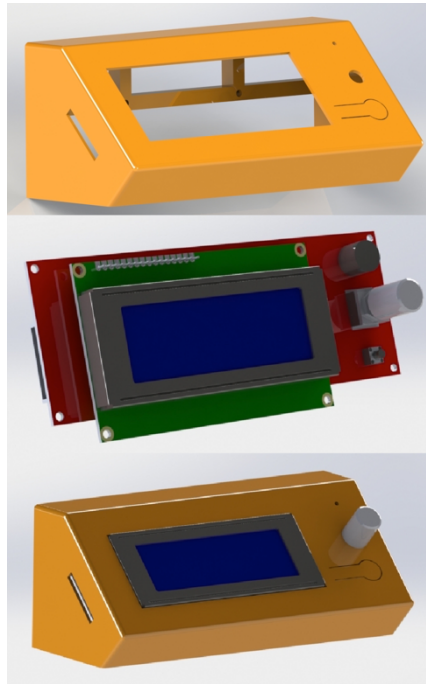


Figura 5.18: Cobertura do controlador eletrónico

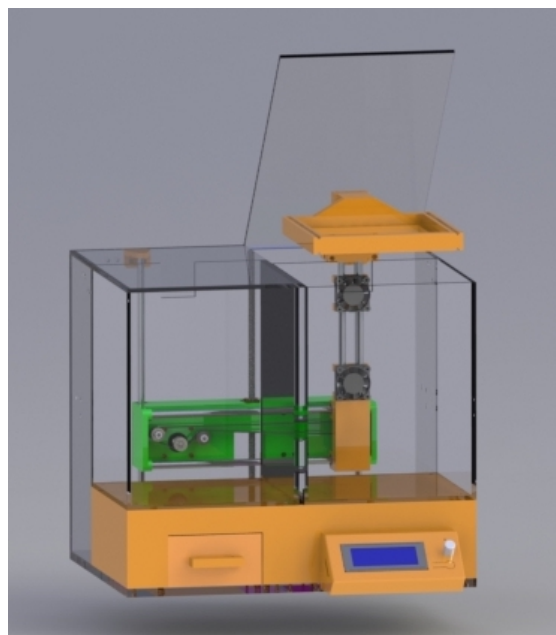


Figura 5.19: Montagem da máquina com as peças já modeladas.

É possível observar que o braço representado na figura anterior (Fig. 5.19) não é o mesmo que foi modelado anteriormente e apresentado nas figuras (Fig. 5.8 e 5.9). Esta alteração será explicada mais à frente na parte do controlo da qualidade.

O passo seguinte foi modelar o sistema de elevação das tampas dos recipientes. Para tal foi definido que estas estariam presas à parte traseira da máquina através de dobradiças. A modelação destes sistemas de elevação das tampas resultou num mecanismo composto por peças impressas por MA, componentes comprados e componentes maquinados. Este mecanismo pode ser observado na seguinte figura (Fig. 5.20). Os mecanismos são os dois diferentes pois estão adaptados para serem instalados cada um num lado da máquina para fazerem subir e descer as tampas individualmente.

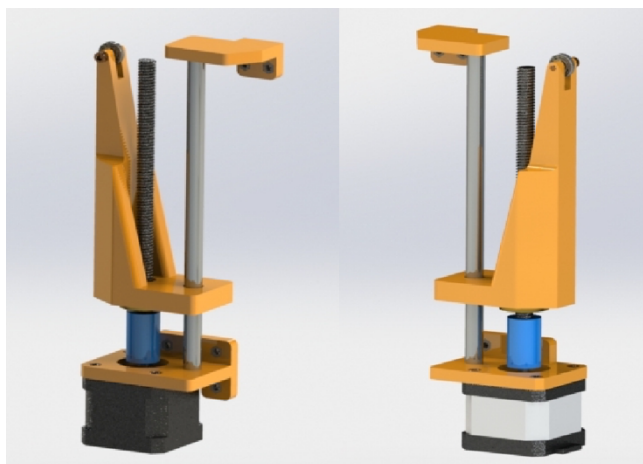


Figura 5.20: Mecanismo do sistema de elevação das tampas.

Este mecanismo é composto por um motor e o seu suporte, que tem acoplado um fuso trapezoidal, um varão, um suporte superior do mesmo, um acoplador rígido para ligar o motor ao fuso e a peça que sofre o deslocamento. Esta peça (peça de maiores dimensões na figura anterior) tem um rolamento no topo que é o componente que vai estar em contacto com as tampas dos recipientes e o movimento é transferido através de uma porca trapezoidal aparafusada à parte de baixo. O varão tem o propósito de fazer com que a peça que sobe e desce não sofra rotação sobre o fuso roscado. Na seguinte figura (Fig. 5.21) podemos observar uma ilustração deste mecanismo montado na máquina.



Figura 5.21: Sistema de elevação das tampas dos recipientes.

Por último, modelaram-se as peças de menor dimensão e que estariam relacionadas à parte elétrica da máquina. Estas peças foram posteriormente impressas por MA e incluem os suportes dos motores de vibração, das ventoinhas, dos sensores de fim de curso e ainda peças para fixar os fios elétricos aos componentes e à caixa exterior. Estes componentes modelados podem ser observados nas seguintes figuras (Fig. 5.22 e 5.23).

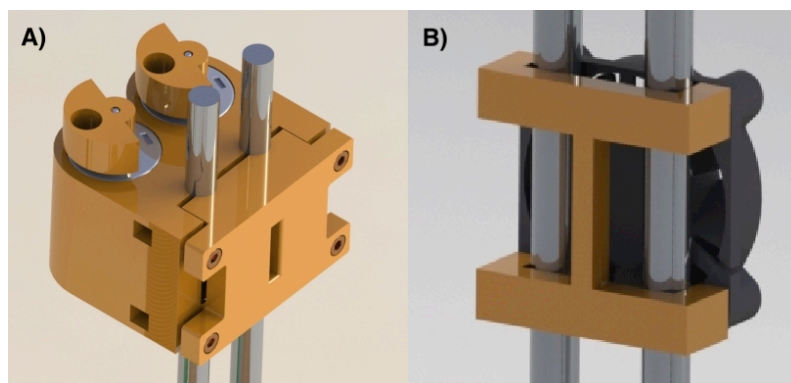


Figura 5.22: Suporte a) dos motores de vibração b) das ventoinhas.

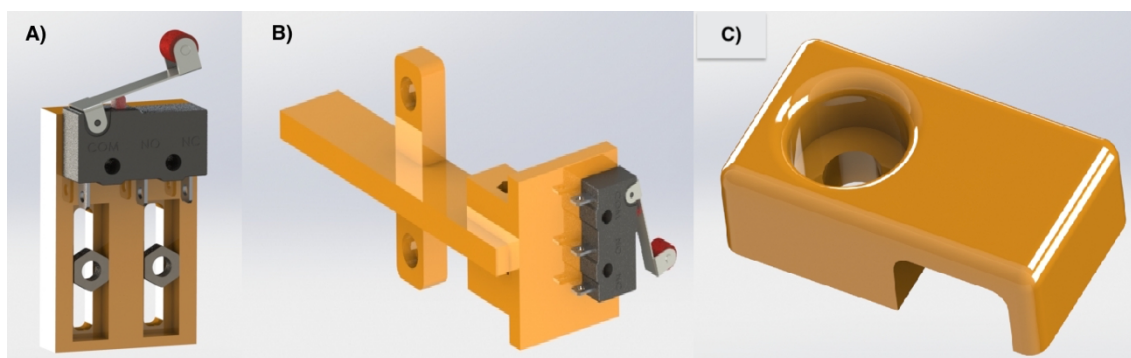


Figura 5.23: Suportes dos sensores (a) e b)) e suporte de cabos (c).

As ventoinhas podem ser ajustadas em altura de modo a fornecer a melhor secagem possível de acordo com as peças mais frequentemente impressas pelo utilizador. Os sensores de fim de curso também podem ser ajustados manualmente de modo a realizar uma programação da máquina mais precisa.

Depois de modelados todos os componentes foi realizada a montagem final da máquina em CAD de modo a verificar a sua funcionalidade e se todos os componentes estavam bem dimensionados. Esta verificação confirmou a viabilidade de construção da máquina e mostrou que não existiriam problemas associados. Na seguinte figura (Fig. 5.24) é possível observar a modelação final da máquina que posteriormente foi utilizada na construção do protótipo funcional. No anexo C deste documento encontram-se mais ilustrações da máquina.

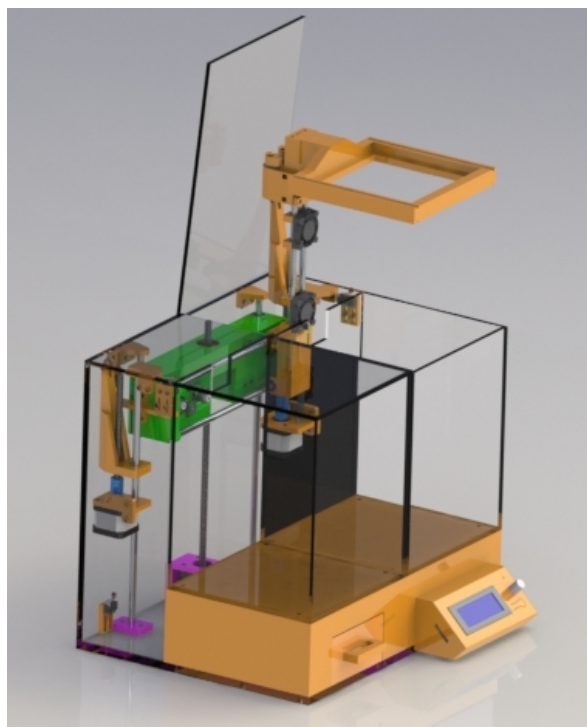


Figura 5.24: Montagem final da máquina em CAD.

5.6.2. Impressão de peças e compra de componentes à medida

Para imprimir as peças que estavam destinadas a serem impressas por MA foi utilizada a impressora *Original Prusa Mk3* (Fig. 5.25). Começou-se por imprimir as peças de maior dimensão que seriam também as primeiras a ser montadas. É de notar que a máquina foi sendo montada ao longo do processo de impressão de peças e obtenção de componentes e por isso foi importante imprimir em primeiro lugar as peças que causavam maior dependência relativamente aos restantes componentes.

Em primeiro lugar imprimiu-se o mecanismo principal da máquina para realizar a prova de conceito e verificar se não existiam realmente erros entre a modelação CAD. Esta impressão foi realizada a uma escala de 1:2 de modo a gastar menos filamento e como tal todos os componentes, incluindo os motores, varões e outras peças foram também impressas. Na figura (Fig. 5.26) encontra-se esta impressão.

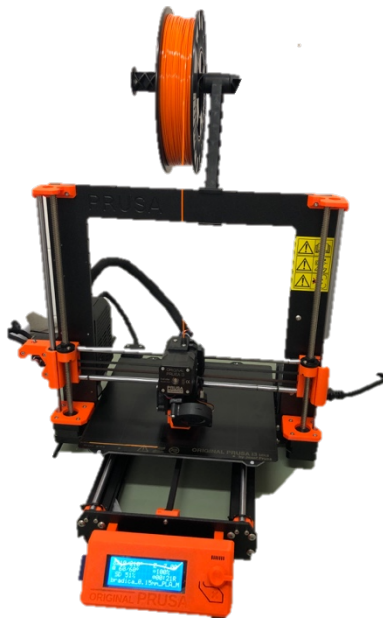


Figura 5.25: Original Prusa Mk 3.

Todas as peças foram impressas com uma temperatura de extrusão de 215°C (Celsius), mesa de impressão a 55° C, com uma espessura de camada de 0.15 milímetros, filamento de 1.75 milímetros de diâmetro e *nozzle* de 0.4 milímetros de diâmetro. Estes parâmetros de impressão foram utilizados realizando um balanço entre a qualidade final das peças e a qualidade de impressão. Utilizando os modelos em *Solidworks* convertidos para formato STL, estes foram posteriormente convertidos para *gcode* utilizando o software *Slic3er Prusa Edition*. O enchimento das peças variou entre 15% e 30%.



Figura 5.26: Modelo do mecanismo principal impresso à escala.

As restantes peças e componentes que não foram impressos por MA, foram comprados. Os recipientes e as placas apresentadas nas figuras 5.14 e 5.15 foram compradas a uma empresa especializada em corte e manuseamento de acrílicos, que realizou o corte e respetiva união das duas placas à medida após lhe terem sido enviados os desenhos técnicos com as medidas exatas.

Os restantes componentes como motores elétricos, sensores, fios elétricos, fusos, varões, parafusos, porcas e outros componentes foram adquiridos em duas lojas distintas sendo uma especializada em componentes relacionados com impressão 3D e outra especializada em eletrónica. Uma lista com todos os componentes da máquina encontra-se disponível no anexo B no final deste documento.

Terminada esta fase, foi realizado um controlo da qualidade das peças impressas em 3D. O maior problema nesta fase verificou-se nas peças de maior dimensão, mais especificamente nas peças da caixa exterior observadas na figura 5.16. Estas sofreram deformações causadas pelo levantamento das peças da mesa de impressão. Um exemplo deste defeito pode ser observado na seguinte figura (Fig. 5.27).

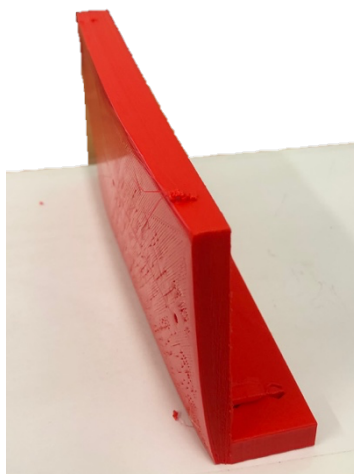


Figura 5.27: Deformação observada em peças esbeltas de grande dimensão.

A resolução deste problema consistiu em aumentar a temperatura da mesa de impressão de 55° para 60° C e criar maior adesão na mesma através da aplicação de laca convencional em spray no início das impressões.

5.6.3. Maquinação de componentes e montagem

Nesta fase foi realizada a montagem final da máquina utilizando todos os componentes anteriormente impressos e adquiridos. Apesar de quase todas as peças estarem prontas para serem montadas, foi necessário maquinar alguns dos componentes. Nomeadamente realizou-se o corte de varões e fusos segundo as suas dimensões exatas e realizaram-se todos os furos nas placas de acrílico necessários para a montagem dos restantes componentes. Para realizar a montagem da máquina é apenas necessário uma chave de aperto visto que todos os parafusos são M3, variando apenas o comprimento dos mesmos.



Figura 5.28: Fase intermédia da montagem final.

A montagem da máquina correu como previsto e não houve nenhum imprevisto tirando o erro humano na furação do acrílico que obrigou à criação de suportes ajustáveis nomeadamente para os varões verticais do mecanismo principal. Um dos aspetos a considerar no futuro é encomendar as placas de acrílico com os furos já realizados pois dessa maneira é possível reduzir o tempo de produção/construção da máquina e anular o erro humano visto que o acrílico é cortado por uma centro de maquinagem CNC. Na seguinte imagem (Fig. 5.29) é possível observar o resultado final da montagem da máquina que é efetivamente o protótipo final.

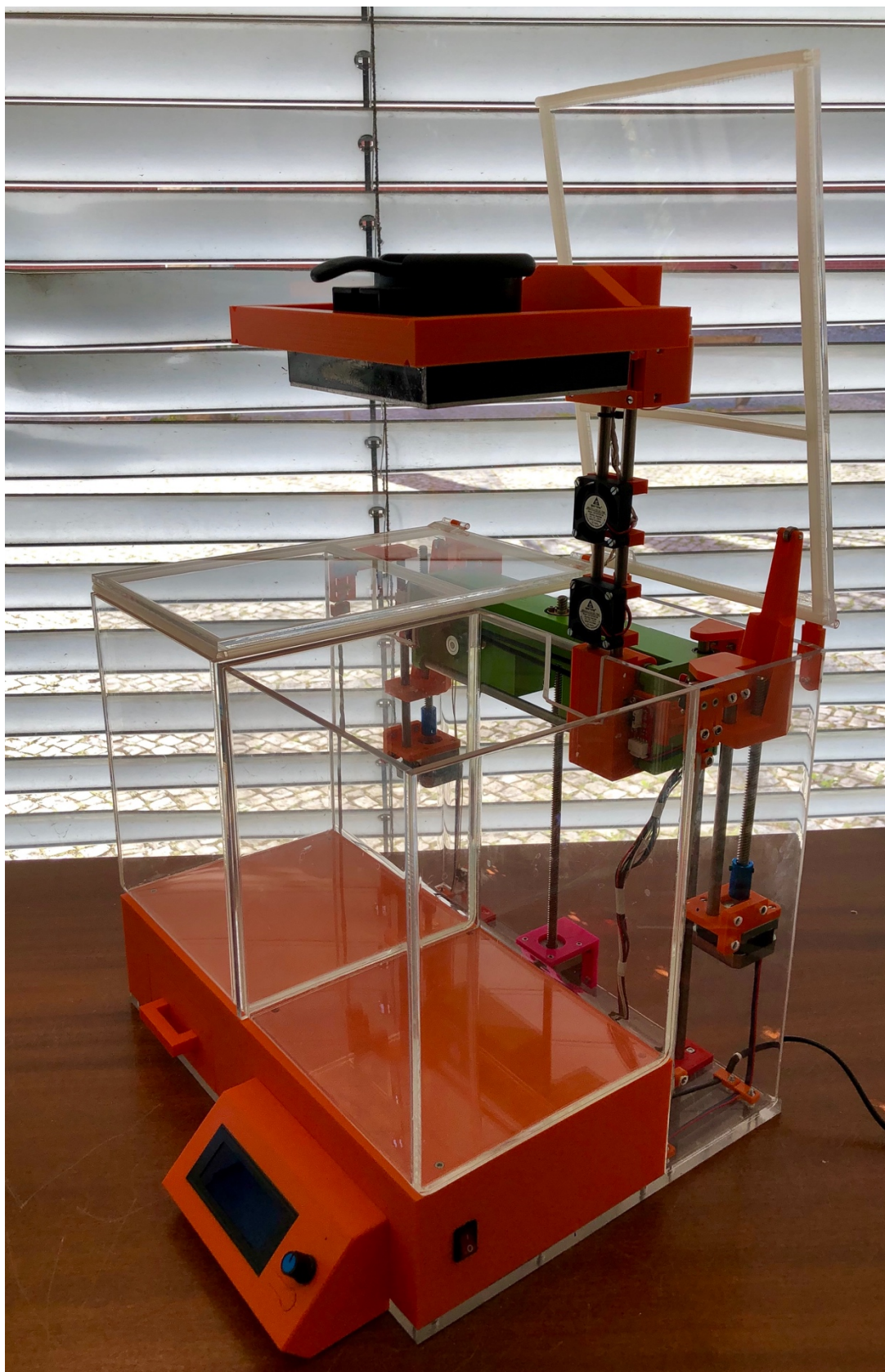


Figura 5.29: Protótipo final da máquina.

5.6.4. Controlo da qualidade final

No final da montagem foi necessário realizar um controlo da qualidade para verificar o correto funcionamento da máquina. Durante este processo verificaram-se alguns problemas, sendo apenas um desses não conceptual. O problema não conceptual estava relacionado com a impressão 3D, nomeadamente na direção de impressão de algumas peças. Num processo de impressão de FDM a orientação de impressão é de grande importância, pela colocação de suportes, acabamento das superfícies e principalmente pelas propriedades mecânicas das peças [37]. Para efeitos de prototipagem, a orientação de partes cilíndricas é normalmente na posição vertical. Isto resulta em secções circulares geometricamente mais precisas e com melhor acabamento, mas também diminui a sua resistência a forças de tração e tensões de corte (Fig. 5.30).

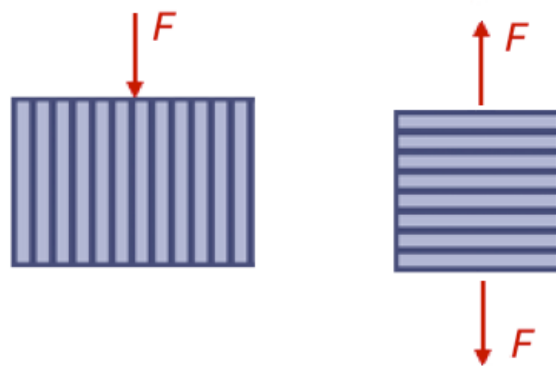


Figura 5.30: Diferença na direção de impressão numa peça com a mesma força aplicada.

A solução para este problema foi bastante simples, passando simplesmente por refazer o *gcode* alterando a orientação das peças. Na seguinte imagem (Fig. 5.31) podemos observar um exemplo de uma peça que cedeu devido às forças de tração geradas pela inserção dos varões e da mesma peça impressa já com a orientação adequada.

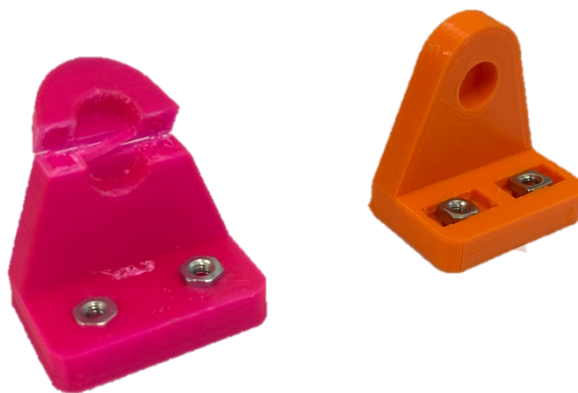


Figura 5.31: Falha por rutura nos suportes dos varões.

Os restantes problemas verificaram-se no braço e nas peças acopladas aos motores destinadas a causar desequilíbrio e consequentemente vibração. Estes problemas eram conceptuais pelo que foi necessário modelar novamente estes componentes em CAD. Nas peças de vibração verificou-se que devido à sua baixa massa, estas não geravam vibração suficiente para limpar as peças corretamente no IPA, pelo que a solução consistiu em aumentar o diâmetro e a massa das mesmas. A massa foi aumentada através da inserção de pequenas secções de varões de aço. Na figura 5.32 podemos observar uma imagem das diferentes versões. Com esta alteração verificou-se um aumento substancial na vibração do conjunto do braço, sendo que no futuro, caso seja necessário aumentar a vibração, basta aumentar a massa e/ou a distância ao eixo de rotação das mesmas.

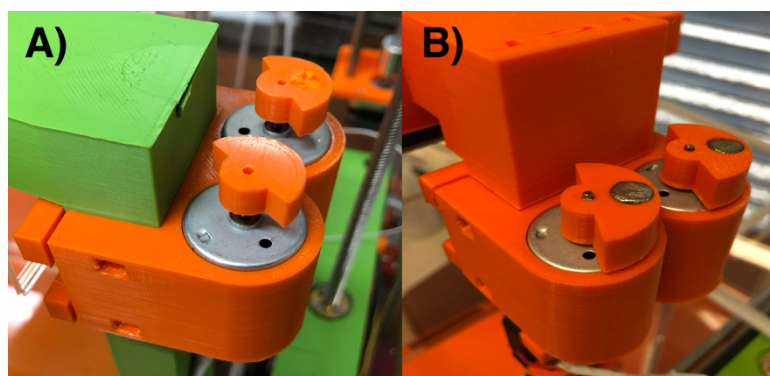


Figura 5.32: Peças de vibração montadas nos motores,
a) 1ª versão b) 2ª versão

Por último, e como já se tinha referenciado anteriormente, foi necessário realizar alterações ao braço de suporte das peças a tratar pela máquina. Esta alteração deveu-se principalmente a dois fatores. Em primeiro lugar, o encaixe para a mesa de impressão da *Formlabs 1+* estava sobredimensionada o que fazia com que a mesa por vezes caísse pela abertura do braço o que é totalmente indesejável. Em segundo lugar, na parte superior do braço estava previsto ser encaixado o cesto de peças a tratar que já foi apresentado anteriormente, mas após a montagem verificou-se que não seria possível utilizar o cesto ao mesmo tempo que a mesa de impressão. Em terceiro e último lugar, as ventoinhas ao estarem apoiadas totalmente no braço, não tinham abertura para realizar a sucção de ar adequada ao seu correto funcionamento. Para corrigir estes aspetos foram realizadas alterações que também resultaram numa otimização na produção deste componente. O tempo de produção foi reduzido de 31 horas e 30 minutos para 19 horas, o que representa uma redução de 40%, e o custo manteve-se praticamente igual dada a adição de varões de aço no novo design. Na seguinte imagem (Fig. 5.33) é possível observar o “novo” braço modelado em CAD, com todos os componentes montados no mesmo. Também é possível observar o braço na figura 5.29 já inserido na montagem final.



Figura 5.33: Modelação final do braço em CAD.

5.6.5. Instalação elétrica

Foi realizada a instalação de todos os componentes elétricos da máquina ficando apenas em falta a instalação dos LED's de cura UV. Os motores utilizados na montagem foram motores passo a passo, escolhidos por terem um controlo de precisão. Os sensores utilizados são sensores de fim de curso comuns. Os motores de vibração e as ventoinhas seleccionadas são de 12 volts de corrente alternada. A placa de circuito utilizada foi a *Arduino Mega* em conjunto com a *Ramps 1.4* equipada com quatro drivers de motores passo a passo e um ecrã de controlo e interação *Ramps lcd 2004*. Para fornecer corrente elétrica a todo o conjunto foi utilizado um transformador de 12 volts de 5.0 amperes. Com esta instalação podemos agora afirmar que este é um protótipo funcional. Na seguinte imagem (Fig. 5.34) é possível observar a montagem.

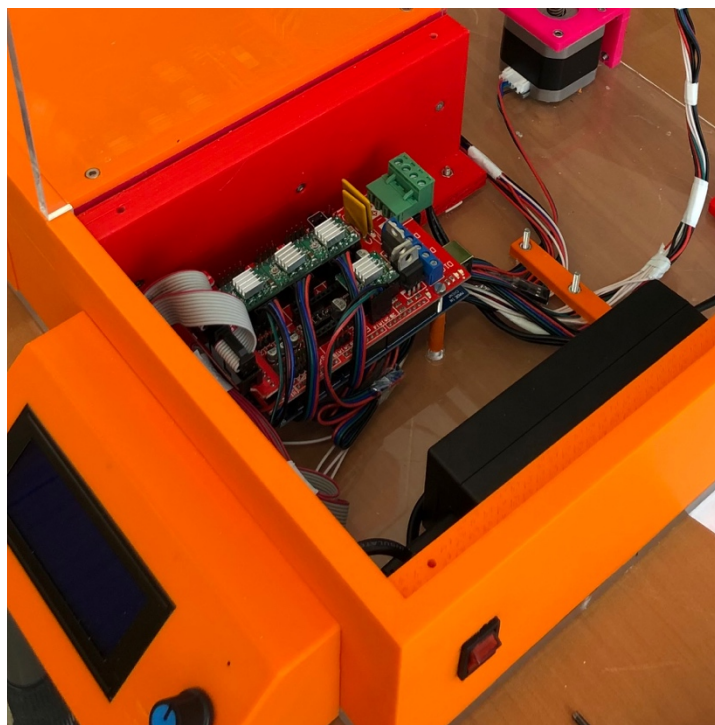


Figura 5.34: Montagem final dos componentes elétricos.

5.7. Protótipo, testes e especificações finais

Com o protótipo produzido foi possível realizar testes de funcionamento e eficácia assim como verificar se as especificações alvo foram alcançadas, possivelmente identificando as limitações e áreas de melhoria.

Durante a programação da máquina verificou-se que um dos motores das tampas não tinha força suficiente para fazer subir a mesma. Para resolver este problema começou-se por aumentar a corrente transmitida para esse motor mas não se verificou nenhuma melhoria. Depois optou-se por trocar o motor, o que também não resolveu o problema. Por fim, fez-se um ajuste ao sistema mecânico de abertura da tampa e também não se verificaram melhorias. Após falar com um especialista da área e demonstrar o problema, chegou-se à conclusão que a placa de circuitos que controla os motores (ramps 1.4) tem um defeito de fabrico que leva à perda de corrente no terminal do motor em questão.

Esta placa de circuitos defeituosa fez também com que a alimentação elétrica normal da máquina não fosse suficiente para fornecer energia ao ecrã de controlo pelo que foi necessário ligar um transformador adicional de 5 volts à placa através da sua interface USB.

Durante o primeiro teste funcional da máquina os motores de vibração deixaram de funcionar passados cerca de 6 minutos. Esta avaria deu-se pela rotação sofrida pelos motores dentro do próprio suporte. Esta rotação fez com que os cabos de alimentação dos mesmos se torcessem levando finalmente à rutura da ligação soldada entre os cabos e os motores. Para solucionar este problema, os suportes dos motores foram aperfeiçoados para conter peças que impedem a rotação dos mesmos. Nos testes seguintes verificou-se que esta alteração solucionou o problema.

A vibração fornecida às peças impressas é feita através de dois motores que transferem rotação a peças excêntricas. Durante os testes verificou-se que a massa igual destas peças nos dois motores fazia com que houvesse uma certa sincronia fazendo com que o efeito de vibração fosse inferior ao desejado. Foi possível aumentar o efeito vibratório alterando a massa destas duas peças para que tenham massas diferentes.

Após o primeiro teste verificou-se que as ventoinhas de secagem estavam desalinhadas com as peças tendo sido necessário reposicioná-las de modo a que estas abranjam a maior área possível das mesmas. Foi necessário adicionar mais cabo elétrico e voltar a soldar as ligações.

O sistema mecânico de elevação das tampas verificou-se ser instável devido a uma folga entre o veio guia e a peça que levanta a tampa. Para solucionar este problema foi redesenhada esta peça de modo a que fosse possível inserir um rolamento para fazer a ligação entre a peça e o veio guia e assim impedir as oscilações ocorrentes. No entanto, esta solução não foi aplicada visto este problema não ser crítico e requerer a compra de peças adicionais.

A máquina foi desenhada e construída com a intenção de ser automatizada, sendo o controlo dos motores realizado pela ramps 1.4 e os restantes componentes elétricos (motores de vibração, ventoinhas e luzes de cura) por uma placa de relés conectada à placa de Arduino que por sua vez está ligada à placa ramps 1.4. Nesta fase de prototipagem não foi possível realizar a programação completa da máquina e o controlo dos relés foi um dos aspetos que ficou em falta. Por esta razão foi necessário instalar interruptores na caixa exterior da máquina para realizar o controlo dos componentes elétricos conectados aos relés como é possível observar na seguinte figura (fig. 5.35).



Figura 5.35: Interruptores de controlo.

Foi desenhada uma peça de teste para verificar a eficácia de limpeza das peças e foram impressas quatro destas em diferentes tamanhos (fig. 5.36).



Figura 5.36: Peças de teste.

No final verificou-se a eficácia de limpeza das peças bem como o correto funcionamento de todos os componentes da máquina. Na seguinte figura podemos observar a resina não curada a ser removida de uma peça durante o processo de limpeza (fig. 5.37).

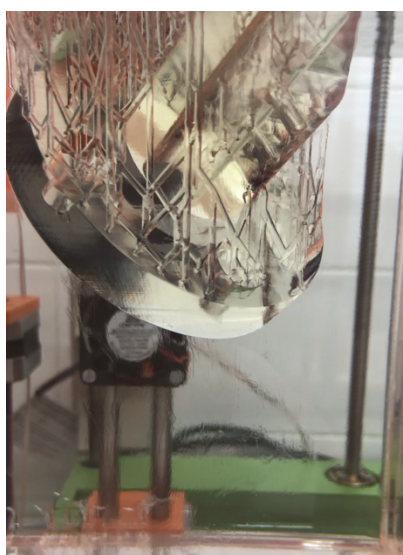


Figura 5.37: Remoção de resina

Verificou-se em todos os testes que após 10 minutos de vibração as peças deixaram de soltar resina pelo que o tempo pré-definido de 15 minutos é suficiente, sendo este ajustável posteriormente caso necessário. O tempo de cura testado foi de 60 minutos nos quatro testes e verificou-se que as peças ficaram curadas corretamente.

Depois de realizados os testes de funcionamento e as devidas correções e melhorias foi possível confirmar as especificações finais.

As especificações relacionadas com o design foram atingidas neste conceito.

A dimensão mínima e profundidade máxima dos detalhes verificou-se ao realizarem-se testes a peças de teste iguais repetidamente. Para verificar as

limitações da máquina teriam de se realizar inúmeros testes com peças de diferentes dimensões, geometrias e detalhes.

O controle de saturação do IPA estava previsto e sendo um dispositivo de pequenas dimensões pode ser instalado posteriormente no protótipo ou num produto final, mas para efeitos de prototipagem não foi adquirido.

O tempo de secagem das peças a tratar após estas serem retiradas estava previsto ser de 5 minutos. Este tempo verificou-se estar entre os 3-5 minutos dependendo da geometria das peças e da temperatura ambiente.

A viscosidade superficial ser 0 como foi definido anteriormente nas especificações implica que as peças ficam completamente limpas e livres de resina não curada depois do banho de IPA. Não existe nenhuma maneira exata de verificar este aspeto, no entanto através de inspeção visual, é possível verificar relativamente bem esta especificação.

As especificações: número de interações, número de movimentos e tempo de montagem; foram alcançadas. No entanto, não foi possível alcançar o tempo de transferência da peças do IPA para a cura pois o processo de secagem das peças é realizado durante esta transferência. Este tempo passou então de 20 segundos para 5 minutos e 30 segundos.

Para efeitos de prototipagem não foi possível verificar especificações como: instruções de montagem, ciclos até haver falha, rugosidade no interior do recipiente, altura máxima de queda, número de utilizações até limpeza, quantidade de saturação recuperada, sensação táctil e máxima resistência nos motores. Estas especificações teriam de ser testadas exaustivamente, verificadas ou criadas caso se desejasse construir um produto final.

As especificações: localização visível do botão ON/OFF, facilidade de utilização, tempo de substituição, recipiente de IPA removível e sensor de pressão; foram verificadas sem grande dificuldade.

Não foram realizados quaisquer testes mecânicos por três razões:

- Testes de simulação em softwares como o *ansys* não seriam válidos pois grande parte dos componentes foram impressos por MA em PLA, sendo que estes podem variar em parâmetros de impressão como a percentagem de enchimento, o padrão de enchimento, altura de camada, temperatura de impressão, entre outros. É, portanto, ainda impossível realizar uma introdução precisa ou aproximação das propriedades de peças impressas, em softwares de simulação. Por esta razão quaisquer testes realizados por simuladores não teriam qualquer validade.

- A massa das peças a tratar pela máquina é bastante inferior à massa dos próprios componentes da máquina pelo que qualquer adição de forças causadas pelas peças não irá causar alterações substanciais nos esforços sofridos pelos componentes quando estes estão em repouso sem o peso das peças aplicado.
- Quaisquer testes mecânicos realizados no protótipo final iriam deixar o mesmo inutilizável, o que não seria viável nesta fase de prototipagem dada a dimensão e complexidade da máquina e o custo que estaria associado à encomenda/fabricação peças e componentes necessários à reconstrução da máquina.

Custos conceptuais

O objetivo deste capítulo é estimar os custos de prototipagem da máquina e verificar a possibilidade de realizar uma aproximação aos custos de um eventual produto final. As fontes e fórmulas consideradas são apresentadas, assim como as medições realizadas durante a construção do protótipo.

6.1. Estrutura de custos

Na figura 6.1 é apresentada a estrutura de custos da produção do protótipo. Para cada fonte, as fórmulas aplicadas serão apresentadas [38], assim como os valores utilizados para realizar os cálculos. A soma de todas as parcelas calculadas para cada fonte resultaram no custo unitário final.

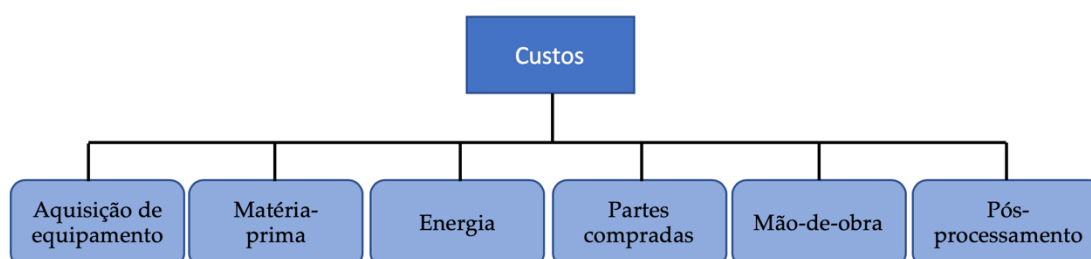


Figura 6.1: Fontes de custo

Este modelo foi baseado na pesquisa bibliográfica sobre custos de produção [39], fornecedores e medições realizadas no processo de fabrico do protótipo. Para os seguintes cálculos serão sempre realizadas estimativas para o protótipo construído (caso 1), e para um eventual produto final onde as peças representadas na figura 5.19 seriam obtidas por corte de chapa de acrílico e não por MA (caso 2). Foi ainda realizado o cálculo para um produto final semelhante ao caso 2 mas em que todas as peças em acrílico passariam a ser em painéis de compósito de alumínio (caso 3). Dada que a única diferença entre o caso 2 e caso 3 é no material comprado, para simplificar serão apenas apresentados os dados do caso 2 nas outras secções. É de notar também que não irá ser necessário qualquer tipo de pós-processamento tanto para o protótipo como para um produto final pelo que não será contabilizado.

6.1.1. Custo do equipamento

O custo do equipamento por unidade é calculado utilizando a equação 1, que multiplica o custo por hora do equipamento pelo número de horas de produção de uma unidade.

$$C_{Eq} = \frac{C_{aq_Eq}}{d_{ano} \times h_{dia}} \times \left[\frac{i \times (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \right] \times h_{produção} \quad \text{Eq. 1}$$

Nesta equação, C_{aq_Eq} é o custo da aquisição da impressora *Original Prusa i3 MK3*, d_{ano} são os dias produtivos do ano, h_{dia} são as horas produtivas do dia, i é o custo de oportunidade, n é o tempo de depreciação em anos e $h_{produção}$ são as horas de produção de uma unidade (demonstradas na secção seguinte). A *Prusa i3 MK3* pode trabalhar de 24 horas por dia, no entanto para obtermos um modelo mais realístico foi considerado um tempo de produção padrão de 22 horas por dia (dado que as impressões são de longa duração e que pode ser feita uma programação para que as novas impressões sejam sempre durante o horário útil), 250 dias de trabalho por ano, um tempo de depreciação de 5 anos para a máquina e um custo de oportunidade de 10%. O custo por hora do equipamento é apresentado em baixo na tabela 6.1 e o custo unitário para o conceito será apresentado na secção 6.2.

Tabela 6.1: Custo do equipamento por hora.

C_{aq_Eq} (€)	d_{ano} (dias)	h_{dia} (horas)	i	n (anos)	C_{Eq} (€/hora)	
995	250	22	0.1	5	Caso 1	Caso 2
					9.16	5.20

6.1.2. Custo da matéria prima

A matéria prima é obtida em forma de rolos de filamento que são vendidas por kilo. O custo da matéria por unidade foi calculado com base nos dados obtidos pelo *Slic3r Prusa Edition* com uma verificação inicial através da massa para garantir a coerência dos dados com as peças reais. Através deste programa é possível obter também informações como o tempo de impressão e filamento utilizado em metros milímetros cúbicos ou gramas. Na seguinte imagem (Fig. 6.2) podemos observar um exemplo.

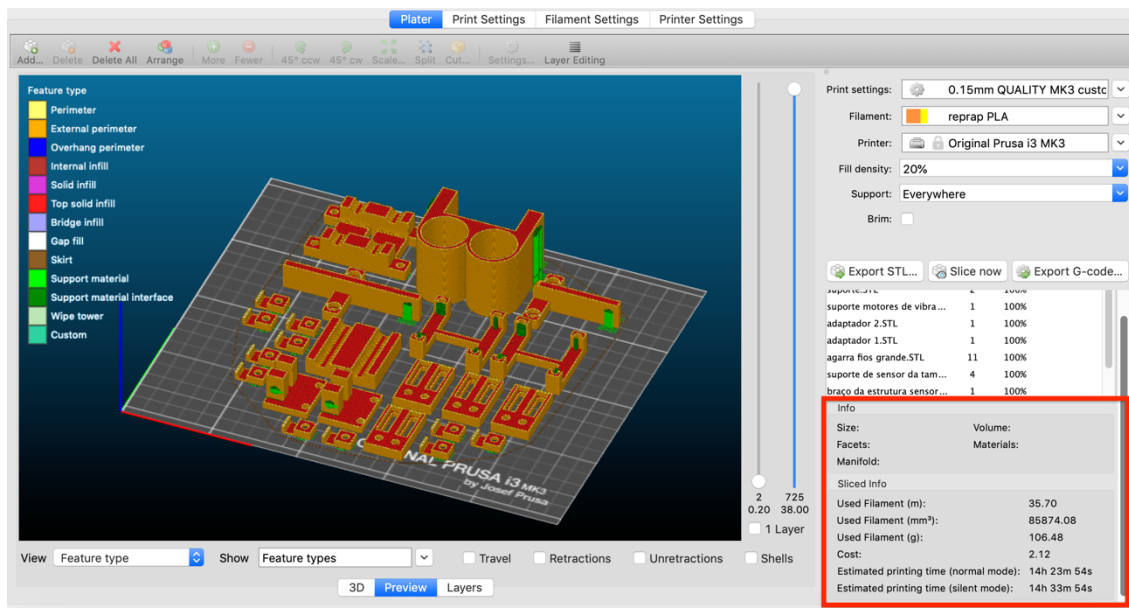


Figura 6.2: Informações de impressão.

O valor do PLA utilizado foi de 19,90€/Kg, obtido num vendedor autorizado em Portugal. As informações dadas pelo software revelaram-se ser bastante precisas pelo que não houve a necessidade de pesar as peças individualmente. Para obter o custo total das peças produzidas foram somados os custos de material utilizado de todas as impressões. Este valor é apresentado em baixo na tabela 6.2 enquanto o custo de produção de cada peça será apresentado no anexo B devido ao elevado número de peças.

Tabela 6.2: Custo e tempo de produção do protótipo.

Custo PLA (€/Kg)	Tempo de produção (horas)		Custo total (€)	
19.90	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
	192	109	38.69	19.54

6.1.3. Custo de energia

Como um eventual processo de fabrico seria semelhante ao de prototipagem, é possível ter medições razoavelmente precisas do consumo energético na produção. Desta forma o custo de energia do protótipo assim como o de um eventual produto final será o preço por KWh que se teria de pagar ao fornecedor de eletricidade multiplicado pela energia consumida durante a produção do protótipo/ uma unidade, como descrito na equação 2.

$$C_{Energia} = C_{KWh} \times E_{utilizada} \quad \text{Eq. 2}$$

Na equação, C_{KWh} representa o custo de energia por KWh (0.16€/KWh) [40] e $E_{utilizada}$ representa a energia consumida na produção de uma unidade.

6.1.4. Peças/componentes comprados

Apesar de grande parte das peças ser produzida na *Original Prusa i3 MK3*, é necessário comprar peças a outras empresas – acrílicos, componentes eletrônicos e mecânicos. A lista completa de todas as peças compradas pode ser observada no final deste documento. Para calcular o custo total das partes compradas foi realizada a soma das mesmas, como descrito na equação 3.

$$C_{\text{Peças compradas}} = \sum C_i \quad \text{Eq. 3}$$

Na equação $\sum C_i$ representa o somatório de todas as peças compradas. Como estas peças seriam praticamente as mesmas, quer para o protótipo como para um eventual produto final, pode-se realizar uma aproximação do que seria o custo das peças compradas para um produto final. É de notar ainda que para a prototipagem estas peças foram compradas em lojas de retalhe o que fez com que o preço de aquisição tenha sido bastante superior quando comparados ao preços de aquisição diretamente no fornecedor. Foi realizada uma pesquisa em websites de fornecedores para verificar esta diferença e concluiu-se que o $C_{\text{Peças compradas}}$ seria cerca de metade ao comprar as peças diretamente ao fornecedor, sem que estas encomendas tivessem de ser em grandes quantidades.

Tabela 6.3: Custo de peças compradas.

$C_{\text{Peças compradas}}$ protótipo (€)	$C_{\text{Peças compradas}}$ diretamente no fornecedor (€)	
420.27	Caso 2	Caso 3
	≈ 239.14	≈ 169.14

6.1.5. Custo de mão-de-obra

O custo de mão-de-obra pelo protótipo não é possível calcular pois trata-se de um processo de desenvolvimento contínuo que não reflete o tempo de mão de obra que seria necessário para um produto final. No entanto, para um produto final, o custo de mão de obra por unidade seria calculado ao multiplicar o custo por hora de um trabalhador de uma empresa, pelo número de horas que esse mesmo trabalhador despende na produção de uma unidade, como representado na equação 4.

$$C_{MO} = \frac{S_{\text{mensal}} \times N_{\text{sal}} \times C_{\text{soc}} + 11 \times Sub_{\text{almoço}}}{d_{\text{ano}} \times h_{\text{dia}} \times f_p} \times h_{\text{trabalho}} \quad \text{Eq. 4}$$

S_{mensal} é o salário mensal, N_{sal} é o número de salários por ano, C_{soc} é a contribuição social, $Sub_{\text{almoço}}$ é o subsídio de almoço, d_{ano} é o número de dias de trabalho por ano, h_{dia} são as horas de trabalho por dia, f_p é um fator de produtividade e h_{trabalho} é tempo em horas gasto pelo trabalhador para uma máquina. Esta fórmula seria aplicada duas vezes, para um trabalhador (Trab.) que realizasse a montagem e qualquer pós-processamento necessário, e para

um trabalhador especializado (Espec.) que presumidamente trabalharia com o software, escolha de parâmetros, encomendas e impressões. Estes dois trabalhadores teriam salários diferentes. Na tabela 6.4 são apresentados os valores utilizados e o resultado estimado do custo por unidade de mão de obra.

Tabela 6.4: Custo por unidade de mão-de-obra.

N_{sal}	C_{soc}	$Sub_{almoço}$ (€)	d_{ano} (dias)	h_{dia} (horas)	f_p	S_{mensal}		$h_{trabalho}$		C_{MO} (€/unid)
						Trab.	Espec.	Trab.	Espec.	
14	1.23	100	228	8	0.9	550	1000	1	0.17	8.5

6.2. Medições e cálculo dos custos de prototipagem

Como já foi referenciado anteriormente, através da produção de um protótipo, é possível obter estimativas aproximadas da produção de um produto final. O tempo e material utilizados foram retirados do software *Slic3r Prusa Edition*, que fornece medidas precisas das peças impressas. Para o consumo de energia não foi possível utilizar um aparelho que realizasse a medição do consumo energético da impressora devido à falta de um. No entanto, através de diversas fontes verificou-se que o consumo energético para as condições de impressão utilizadas é cerca de 150 W que equivale a 0.15 KWh. Esta foi a solução mais adequada para realizar uma estimativa do consumo energético. Na seguinte tabela (tabela 6.5) são apresentados os cálculos estimados da energia consumida.

Tabela 6.5: Custo energético por unidade.

	Caso 1	Caso 2
Horas de produção	192	109
KWh consumidos	28.8	16.35
€ por KWh	0.16	0.16
Custo por unidade (€)	4.61	2.62

Finalmente na seguinte tabela (tabela 6.6) pode ser observado o custo total de prototipagem assim como uma estimativa de custo de uma eventual produção.

Tabela 6.6: Custo total por unidade.

Custos	Prótipo (caso 1) (€/unidade)	Caso 2 (€/unidade)	Caso 3 (€/unidade)
Equipamento	Não aplicável	5.20	5.20
Matéria prima	38.69	19.54	19.54
Energia	4.61	2.62	2.62
Partes compradas	420.27	≈239.14	≈169.14
Mão-de-obra	Não aplicável	8.5	8.5
Total	463.57€	≈275€	≈205€

6.3. Comparação geral

Em qualquer um dos três casos o custo de produção está abaixo dos 500€ o que representa aproximadamente 50% do que os clientes estariam dispostos a pagar (1000€) pela máquina caso esta funcione eficazmente. O caso 1 seria o menos vantajoso dado o elevado tempo de produção das peças impressas em 3D. Os casos 2 e 3 são bastante mais apelativos tanto pelo tempo de produção como pelo custo. A diferença entre estes dois é apenas o material em que a caixa exterior é contruída. Seguindo o modelo do caso 3, ter-se-ia uma margem de aproximadamente 80% em relação ao preço de venda ao público o que representa uma margem apelativa para a comercialização deste produto. No entanto caso se desejasse criar um produto final com base no protótipo desenvolvido nesta dissertação ainda seriam necessários considerar vários aspetos como instalações, aquisição de ferramentas, programação de software, logística entre outros o que levaria a uma queda da margem.



Conclusões e trabalho futuro

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um conceito para uma máquina que realizasse a limpeza de peças impressas em SLA.

Foi utilizada a metodologia de design e desenvolvimento descrita em [6]. A partir da declaração de objetivos, foram estabelecidas as necessidades dos clientes e as especificações. Foram gerados conceitos, de acordo com os pressupostos, limitações e necessidades, de onde foi selecionado um conceito. Este foi modelado e posteriormente foi construído um protótipo funcional, através do qual foi possível definir as especificações finais apesar de não se tratar de um produto final.

Foi realizado um modelo de custo e as medições retiradas da prototipagem foram utilizadas para obter uma aproximação de custo de um eventual produto final.

No final, revelou-se ser mais vantajoso construir caixa exterior em painéis de compósito de alumínio dado o seu tempo de produção reduzido e custo inferior em relação aos outros dois casos.

Os testes de limpeza efetuados verificaram a funcionalidade e eficácia da máquina que era um dos requisitos mais importantes. Os testes de cura final das peças realizados confirmaram que o recipiente de cura funciona eficazmente sendo que, no entanto, os fatores que afetam a eficiência da cura das peças como a potência e comprimento de onda da luz ultravioleta, seriam diferentes num produto final pois no protótipo foram utilizadas lâmpadas de quartzo em vez de luzes LED.

Eventualmente, poderiam ser apresentados outros métodos de produção que poderiam reduzir ainda mais o custo unitário da máquina.

Podemos concluir que a MA é melhor para produzir séries de peças pequenas, mas para peças de grande dimensão é mais vantajoso utilizar outros métodos de produção. O ideal é portanto, é ter uma combinação de MA com métodos convencionais de modo a reduzir o custo e tempo de fabrico da máquina.

7.1. Trabalho futuro

Como acontece em qualquer desenvolvimento de produto, existem sempre novas formas de estudar e realizar melhorias no produto. Para dar continuidade a este trabalho pode ser abordados os seguintes trabalhos:

- Realizar o desenvolvimento de um segundo protótipo utilizando os materiais apresentados no caso 3 e verificando que alterações teriam de ter efetuadas para realizar esta adaptação.
- Estudar métodos alternativos de produção das peças impressas por MA e realizar a devida comparação de tempo e custos de produção.
- Verificar a possibilidade de reduzir os custos de produção da máquina através otimização da mesma.
- Realizar a programação total do software da máquina.
- Estudar detalhadamente os custos de produção de um produto final.

Referências bibliográficas

- [1] H. Lipson, 3D Printing, ModelAirplanes.Com. (2014) 78–83. doi:10.1007/978-3-642-20617-7.
- [2] A.C. De Leon, Q. Chen, N.B. Palaganas, J.O. Palaganas, J. Manapat, R.C. Advincula, High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications, REACT. 103 (2016) 141–155. doi:10.1016/j.react.2016.04.010
- [3] T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T.Q. Nguyen, D. Hui, Additive manufacturing (3D printing): A review of materials , methods , applications and challenges, Compos. Part B. 143 (2018) 172–196. doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [4] “The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D Printing” [Online] Available: <https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>, Tutorials. (2017).
- [5] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies, 2015. doi:10.1007/978-1-4939-2113-3.
- [6] K.T. Ulrich, S.D. Eppinger, Product Design and Development 5th ed., 2009. doi:10.1016/B978-0-7506-8985-4.00002-4.
- [7] K. V. Wong, A. Hernandez, A Review of Additive Manufacturing, ISRN Mech. Eng. 2012 (2012) 1–10. doi:10.5402/2012/208760.
- [8] R. Bogue, 3D printing: The dawn of a new era in manufacturing?, Assem. Autom. 33 (2013) 307–311. doi:10.1108/AA-06-2013-055.
- [9] T.J. Horn, O.L.A. Harrysson, Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications, Sci. Prog. 95 (2012) 255–282. doi:10.3184/003685012X13420984463047.
- [10] T. Wohlers, T. Gornet, History of additive manufacturing Introduction of non-SL systems Introduction of low-cost 3D printers, Wohlers Rep. 2012. (2012) 1–23.

- [11] R. Jones, P. Haufe, E. Sells, P. Iravani, V. Olliver, C. Palmer, A. Bowyer, Reprap - The replicating rapid prototyper, *Robotica*. 29 (2011) 177–191. doi:10.1017/S026357471000069X.
- [12] B. Berman, 3-D printing: The new industrial revolution, *Bus. Horiz.* 55 (2012) 155–162. doi:10.1016/j.bushor.2011.11.003.
- [13] Y. Huang, M.C. Leu, J. Mazumder, A. Donmez, Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations, *J. Manuf. Sci. Eng.* 137 (2015) 014001. doi:10.1115/1.4028725.
- [14] S.H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, L. Hou, Additive manufacturing and its societal impact: A literature review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 67 (2013) 1191–1203. doi:10.1007/s00170-012-4558-5.
- [15] “Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies” [Online] Available: www.astm.org, (n.d.). <https://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>.
- [16] M.D. Monzón, Z. Ortega, A. Martínez, F. Ortega, Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 76 (2014) 1111–1121. doi:10.1007/s00170-014-6334-1.
- [17] P.J.B. (eds. . Paulo Jorge Bártolo (auth.), *Stereolithography: Materials, Processes and Applications*, n.d. doi:10.1007/978-0-387-92904-0.
- [18] S. Kumar, Selective Laser Sintering: A Qualitative and Objective Approach, *Jom.* 55 (2003) 43–47. doi:10.1007/s11837-003-0175-y.
- [19] B.C. Gross, J.L. Erkal, S.Y. Lockwood, C. Chen, D.M. Spence, Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences, *Anal. Chem.* 86 (2014) 3240–3253. doi:10.1021/ac403397r.
- [20] B.J. De Gans, P.C. Duineveld, U.S. Schubert, Inkjet printing of polymers: State of the art and future developments, *Adv. Mater.* 16 (2004) 203–213. doi:10.1002/adma.200300385.
- [21] F.O. Sonmez, H.T. Hahn, Thermomechanical analysis of the laminated object manufacturing (LOM) process, *Rapid Prototyp. J.* 4 (1998) 26–36. doi:10.1108/13552549810197541.
- [22] N.S.A. Bakar, M.R. Alkahari, H. Boejang, Analysis on fused deposition modelling performance, *J. Zhejiang Univ. A.* 11 (2010) 972–977. doi:10.1631/jzus.A1001365.
- [23] F.P.W. Melchels, J. Feijen, D.W. Grijpma, A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering, *Biomaterials*. 31 (2010) 6121–6130. doi:10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.
- [24] H.C. Kim, S.H. Lee, Reduction of post-processing for stereolithography systems by fabrication-direction optimization, *CAD Comput. Aided Des.* 37 (2005) 711–725. doi:10.1016/j.cad.2004.08.009.

- [25] "Material Data Sheet Clear" [Online] Available: <https://formlabs.com/media/upload/Clear-DataSheet.pdf>, (n.d.).
- [26] K. Matzler, H.H. Hinterhuber, How to make product development projects more successful by integrating Kano ' s model of customer satisfaction into quality function deployment, 18 (1998) 25–38.
- [27] T.. Park, K.-J.. Kim, Determination of an optimal set of design requirements using house of quality, J. Oper. Manag. 16 (1998) 569–581. doi:10.1016/S0272-6963(97)00029-6.
- [28] "QFD Online." [Online] Available:<http://www.qfdonline.com/>, (n.d.).
- [29] K. Bremhorst, A Modified Form of the k-e Model for Predicting Wall Turbulence, 103 (2013) 456–460.
- [30] M.R. Dusi, W.I. Lee, P.R. Ciriscioli, G.S. Springer, Journal of Composite Materials, (2014). doi:10.1177/002199838702100304.
- [31] G.H.S. Jack A. Collins, Henry R. Busby, Mechanical Design of Machine Elements and Machines: A Failure Prevention Perspective, (2010) 890 páginas.
- [32] Bs. b Joanna Verran, BSc, MSc, PhD, ~ and Christopher J. Maryan, Retention of Candida albicans on acrylic resin and silicone of different surface topography, (1997).
- [33] "FormLabs Wash&Cure" [Online] Available: <https://formlabs.com/tools/wash-cure/>, (n.d.).
- [34] "Banggood", (n.d.). [Online] Available: <https://pt.banggood.com>.
- [35] G.E. Kouba, O. Shoham, Siamack Shirazi, Design and Performance of Gas Liquid Cylindrical Cyclone Separators, Int. Conf. "Multiphase 95." (1995).
- [36] H.F. Cervone, Applied digital library project management: Using Pugh matrix analysis in complex decision-making situations, OCLC Syst. Serv. Int. Digit. Libr. Perspect. 25 (2009) 228–232. doi:<https://doi.org/10.1108/10650750911001815>.
- [37] J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-plaza, P.J. Núñez, Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling : Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection, Mater. Des. 124 (2017) 143–157. doi:10.1016/j.matdes.2017.03.065.
- [38] B. A. R. Soares, E. Henriques, I. Ribeiro & M. Freitas (2018) Cost analysis of alternative automated technologies for composite parts production, International Journal of Production Research, DOI: 10.1080/00207543.2018.1508903, (n.d.).

- [39] M. Baumers, P. Dickens, C. Tuck, R. Hague, Technological Forecasting & Social Change The cost of additive manufacturing : machine productivity , economies of scale and technology-push, Technol. Forecast. Soc. Chang. 102 (2016) 193–201. doi:10.1016/j.techfore.2015.02.015.
- [40] "preco-kwh" [Online] Available:
<https://lojaluz.com/fornecedores/edp/tarifas/preco-kwh>.



Anexos

Anexo A – Entrevistas

Cliente:	Sara Silvestre	Entrevistador:	António Saldanha
Empresa/Instituição:	FCT, Investigação no departamento de Nanotecnologia	Data:	3/11/2018
e-mail:	si.silvestre@campus.fct.unl.pt	Utilização típica:	Prototipagem
Deseja ter seguimento?	Sim, até seria bastante possível adquirir uma máquina.	Tipo de utilizador:	Investigadora / Serviços externos
Questão:	Declaração do cliente:		Necessidade Interpretada:
Quando e porque é que utiliza este tipo de produto (máquina de limpeza de peças)?	Para este efeito de limpar as peças temos dois recipientes com álcool isopropílico, um recipiente sujo onde mergulhamos as peças durante 1 minuto e outro recipiente com IPA limpo onde deixamos as peças durante 10 minutos. Depois de terminada a limpeza deixamos as peças a secarem ao sol.		A MQ realiza a limpeza das peças impressas de modo a retirar toda a resina não curada. A MQ realiza a limpeza em menos de 11 minutos. A MQ realiza a cura das peças.
Se conhece algum produto similar existente, quais as características que o agradam nesse produto?	Nunca trabalhei com nenhuma máquina deste género, mas sei que existem duas máquinas da Formlabs para o efeito, a de limpeza e a de cura. A de limpeza principalmente, creio que é uma mais valia pois ajuda a limpar as peças.		A MQ realiza uma limpeza rigorosa das peças.
O que é que não o agrada em produtos existentes?	As máquinas da Formlabs apresentam apenas uma pequena melhoria ao método que utilizamos. São necessárias várias intervenções do utilizador à mesma pelo que acaba por ser um processo tão automático como gostaríamos. O método que nós utilizamos é chato e demorado pois além de todas as intervenções necessárias ainda é necessário deixar a peça a secar/curar durante 24 horas. Os processos existentes não limpam bem os orifícios e canais que atravessam as peças, o que no nosso caso é bastante importante pois fazemos muitas simulações de órgãos e se os canais do mesmo não ficarem bem limpos, acabam por ficar entupidos o que torna os protótipos inutilizáveis ou requerem muito trabalho extra para os desentupirem.		A MQ apresenta melhorias substanciais a processo convencionais. A MQ requer apenas uma intervenção do utilizador. A MQ realiza a cura das peças. A MQ realiza a limpeza de pequenos orifícios e canais.
Que aspetos tomaria em consideração ao comprar o produto?	Teria em conta o custo da máquina, o tempo do processo, o tamanho da máquina pois precisamos do maior espaço disponível no laboratório.		A MQ tem um preço acessível. A MQ tem um tamanho adequado a todos os espaços de trabalho.
Que características deveria ter o produto?	Deveria ter a capacidade de processar várias peças ao mesmo tempo. Acessórios especializados para limpar orifícios e pequenas cavidades.		A MQ processa várias peças ao mesmo tempo. A MQ tem acessórios para limpar detalhes nas peças.

Qual o preço máximo que estaria disposto a pagar pelo produto?	Um preço adequado para uma máquina apenas de limpeza seria 500€ e para limpeza e cura seria entre 800€ e 1000€	A MQ custa entre 800-1000€
--	--	----------------------------

Grau de importância de cada característica

Numa escala de 1 a 5, sendo 1 o menos importante e 5 o mais importante, classifique os seguintes aspetos:

5 Rapidez (tempo de limpeza)

5 Eficiência

3 Peso

5 Tamanho: Qual seria o tamanho ideal: canto da secretária

4 Preço

4 Consumo Energético

2 Fácil instalação

4 Portabilidade

5 Automatização

4 Fácil Manutenção

2 Design exterior

4 Adaptação a máquinas específicas (possibilidade de ser adaptada a máquinas específicas)

Obrigado!!!!

António Miguel Quintela de Saldanha
Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa
Mestrado em Engenharia Mecânica, MIEMc
Nº de aluno: 42657

Cliente:	Ana Gaspar	Entrevistador:	António Saldanha
Empresa/Instituição:	FCT, Investigação, Departamento de Materiais	Data:	3/12/2018
e-mail:	am.gaspar@campus.fct.unl.pt	Utilização típica:	Prototipagem
Deseja ter seguimento?	Sim	Tipo de utilizador:	Investigador
Questão:	Declaração do cliente:		Necessidade Interpretada:
Quando e porque é que utiliza este tipo de produto (máquina de limpeza de peças)?	Utilizo este tipo de processo sempre que imprimo peças em SLA. Depois de impressas, mergulho as peças em IPA durante cerca de 15 minutos e vou verificando se é necessário deixar lá a peça mais tempo. Depois disso, escorro a peça em papel absorvente simples e deixo a secar perto da janela cerca de 24 horas. Não realizo qualquer tipo de cura assistida.		A MQ realiza a limpeza das peças impressas de modo a retirar toda a resina não curada. A MQ realiza a limpeza em menos de 15 minutos. A MQ realiza a cura das peças.
Se conhece algum produto similar existente, quais as características que o agradam nesse produto?	Utilizo este método porque não conheço qualquer outro.		
O que é que não o agrada em produtos existentes?	No método que utilizo a parte da limpeza é bastante chata, não limpa bem os orifícios e existe uma grande falta de controlo sobre o banho de IPA.		A MQ tem um funcionamento simples. A MQ limpa orifícios e outros detalhes. A MQ fornece controlo sobre o Banho de IPA.
Que aspetos tomaria em consideração ao comprar o produto?	Gostaria que fosse possível processar mais do que uma peça ao mesmo tempo porque costumo imprimir sempre mais do que uma peça.		A MQ processa múltiplas peças ao mesmo tempo.
Que características deveria ter o produto?	Devia automatizar todo o processo desde a limpeza até à cura e fazer um controlo rigoroso sobre o tempo de limpeza no tanque de IPA.		A MQ funciona de forma automatizada. A MQ realiza o controlo de tempo rigoroso no IPA consoante a resina.
Qual o preço máximo que estaria disposto a pagar pelo produto?	Não tenho muito conhecimento sobre preços de impressoras e respetivos acessórios pois é a faculdade que compra as máquinas, mas diria que até 900€ seria um preço adequado.		A MQ tem um custo de até 900€.

Grau de importância de cada característica

Numa escala de 1 a 5, sendo 1 o menos importante e 5 o mais importante, classifique os seguintes aspetos:

3 Rapidez (tempo de limpeza)

5 Eficiência

2 Peso

4 Tamanho: Qual seria o tamanho ideal: O tamanho mais ou menos de uma impressora.

4 Preço

3 Consumo Energético

5 Fácil instalação

2 Portabilidade

5 Automatização

5 Fácil Manutenção

3 Design exterior

4 Adaptação a máquinas específicas (possibilidade de ser adaptada a máquinas específicas)

Obrigado!

António Miguel Quintela de Saldanha
Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa
Mestrado em Engenharia Mecânica, MIEMc
Nº de aluno: 42657

Cliente:	Frederico Barbosa	Entrevistador:	António Saldanha
Empresa/Instituição:	DOWIRE	Data:	22/11/2018
e-mail:	dowire@dowire.pt	Utilização típica:	Comercialização
Deseja ter seguimento?	Sim	Tipo de utilizador:	Profissional
Questão:	Declaração do cliente:		Necessidade Interpretada:
Quando e porque é que utiliza este tipo de produto (máquina de limpeza de peças)?	Realizo sempre a pré-limpeza das peças impressas em SLA em álcool isopropílico, normalmente num recipiente de plástico entre 20 a 25 minutos. Depois disso, faço a lavagem da peça com água e sabão antes de a curar.		A MQ realiza a limpeza das peças impressas de modo a retirar toda a resina não curada. A MQ realiza a limpeza em menos de 20 minutos. A MQ realiza a cura das peças.
Se conhece algum produto similar existente, quais as características que o agradam nesse produto?	Já ouvi falar de uma máquina que faz a limpeza das peças em IPA, mas nunca utilizei. O que faço normalmente é pôr o recipiente com o IPA em cima de uma lixadora orbital durante 4-5 minutos para agitar o álcool e depois deixo o mesmo em repouso mais 20 minutos.		A MQ fornece agitação ao álcool.
O que é que não o agrada em produtos existentes?	O método que utilizo atualmente demora muito tempo, normalmente entre uma a duas horas. Além disso, a parte de retirar os suportes também é muito demorada.		A MQ tem um tempo de processamento baixo. A MQ retira os suportes da peça.
Que aspetos tomaria em consideração ao comprar o produto?	A automatização da máquina seria um aspeto fundamental. A eficácia de limpeza também. Se possível, ajudar a retirar os suportes.		A MQ é automática. A MQ é eficaz na limpeza das peças.
Que características deveria ter o produto?	A capacidade de tratar várias impressões ao mesmo tempo. Tem de mostrar realmente melhorias em relação ao processo que utilizo. As peças tratadas nesta máquina teriam de ter diferenças notáveis em termos de qualidade em relação às peças tratadas pelo método "convencional".		A MQ permite processar várias peças ao mesmo tempo. A MQ apresenta melhorias substanciais aos processos convencionais.
Qual o preço máximo que estaria disposto a pagar pelo produto?	Tenho um grande conhecimento nesta área até porque a nossa empresa comercializa todo o tipo de produtos para impressão 3D. Diria que 500€ seria um bom preço para uma máquina que apenas realizasse a limpeza e 1000€ para uma máquina que fizesse a limpeza e cura automaticamente. Também quero apontar que se os resultados obtidos através desta máquina fossem realmente evidentes, então nesse caso o preço poderia		A MQ custa entre 500-1000€

	estar já em valores mais altos, diria mesmo que no patamar das impressoras.	
--	---	--

Grau de importância de cada característica

Numa escala de 1 a 5, sendo 1 o menos importante e 5 o mais importante, classifique os seguintes aspetos:

4 Rapidez (tempo de limpeza)

5 Eficiência

2 Peso

3 Tamanho: Qual seria o tamanho ideal: tamanho equivalente a uma impressora.

4 Preço

2 Consumo Energético

4 Fácil instalação

2 Portabilidade

4 Automatização

4 Fácil Manutenção

4 Design exterior

4 Adaptação a máquinas específicas (possibilidade de ser adaptada a máquinas específicas)

Obrigado!!!!

António Miguel Quintela de Saldanha
Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa
Mestrado em Engenharia Mecânica, MIEMc
Nº de aluno: 42657

Cliente:	Filipe Silvestre	Entrevistador:	António Saldanha
Empresa/Instituição:	FabLab FCT	Data:	27/11/2018
e-mail:	f.silvestre@campus.fct.unl.pt	Utilização típica:	Prototipagem/formação pedagógica
Deseja ter seguimento?	Sim	Tipo de utilizador:	Profissional
Questão:	Declaração do cliente:		Necessidade Interpretada:
Quando e porque é que utiliza este tipo de produto (máquina de limpeza de peças)?	Utilizo a impressão SLA normalmente para criar peças com maior rigor, detalhe e precisão. Depois de impressas, faço a limpeza das peças num banho de IPA dentro de um recipiente.		A MQ realiza a limpeza das peças impressas de modo a retirar toda a resina não curada.
Se conhece algum produto similar existente, quais as características que o agradam nesse produto?	Sei que existe uma empresa que vai lançar uma máquina para fazer a limpeza e a cura das peças em Dezembro deste ano. Fora disso, não conheço qualquer outro método de realizar a limpeza e cura das peças sem este banho de IPA nos tupperwares. Aliás, como não temos máquina de cura, o que fazemos é deixar as peças ao ar livre.		A MQ realiza a cura das peças depois de estas serem limpas.
O que é que não o agrada em produtos existentes?	Acho que o processo que utilizo atualmente é chato por ser manual e demorado. Sinto que o pós-processamento de SLA é feito um pouco "em cima do joelho" e há pouco rigor e controlo neste processo.		A MQ é automática. A MQ fornece um controlo rigoroso sobre o banho de IPA.
Que aspetos tomaria em consideração ao comprar o produto?	A automatização da máquina sem dúvida e a facilidade de utilização.		A MQ é fácil de utilizar.
Que características deveria ter o produto?	Acho que deveria realizar a limpeza e a cura automaticamente sem que o utilizador tenha de intervir. Deveria também ter a capacidade de limpar varias peças ao mesmo tempo.		Todo o processo da MQ é automatizado. A MQ permite processar múltiplas peças ao mesmo tempo.
Qual o preço máximo que estaria disposto a pagar pelo produto?	Qualquer coisa entre os 600€ e os 1000€ não seria nada fora do comum.		A MQ custa entre 600-1000€

Grau de importância de cada característica

Numa escala de 1 a 5, sendo 1 o menos importante e 5 o mais importante, classifique os seguintes aspetos:

4 Rapidez (tempo de limpeza)

5 Eficiência

1 Peso

3 Tamanho: Qual seria o tamanho ideal: o dobro de uma impressora no máximo.

5 Preço

4 Consumo Energético

5 Fácil instalação

2 Portabilidade

5 Automatização

5 Fácil Manutenção

3 Design exterior

4 Adaptação a máquinas específicas (possibilidade de ser adaptada a máquinas específicas)

Obrigado!!!!

António Miguel Quintela de Saldanha
Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa
Mestrado em Engenharia Mecânica, MIEMc
Nº de aluno: 42657

Cliente:	João Sousa	Entrevistador:	António Saldanha
Empresa/Instituição:	FabLab ISCTE	Data:	30/11/2018
e-mail:	joao_pedro_sousa@iscte-iul.pt	Utilização típica:	Prototipagem e modelos funcionais
Deseja ter seguimento?	Sim. Gostaria até de testar a máquina durante uma semana.	Tipo de utilizador:	Profissional
Questão:	Declaração do cliente:		Necessidade Interpretada:
Quando e porque é que utiliza este tipo de produto (máquina de limpeza de peças)?	Por indicação da Formlabs, utilizamos o processo de limpeza em álcool isopropílico sempre que imprimimos peças em SLA. De momento realizamos esta limpeza nos recipientes que vieram com a máquina. Normalmente deixamos as peças entre 10 a 20 minutos no recipiente e depois realizamos a cura numa máquina própria que adquirimos para o efeito.		A MQ realiza a limpeza das peças impressas de modo a retirar toda a resina não curada. A MQ realiza a limpeza em menos de 20 minutos. A MQ realiza a cura das peças.
Se conhece algum produto similar existente, quais as características que o agradam nesse produto?	Não tenho qualquer experiência com produtos que façam a limpeza, mas sei que a Formlabs tem duas máquinas para o efeito, uma que faz a limpeza e outra que faz a cura. No entanto, estas máquinas da Formlabs são muito caras pois cada uma custa 600€ e mesmo assim é necessária a intervenção do utilizador.		A MQ tem um custo acessível. A MQ funciona de forma autónoma.
O que é que não o agrada em produtos existentes?	O processo de limpeza que utilizo é muito demorado e o álcool nos recipientes fica bastante sujo após poucas utilizações o que faz com que resíduos de resina presentes no álcool fiquem agarrados a outras peças. Também não gosto deste método pois tem de se esperar muito tempo pela secagem do álcool depois da peça ser retirada do recipiente, até se proceder à cura. Já me aconteceu esquecer-me de peças dentro do álcool o que torna as mesmas inutilizáveis.		O MQ faz a filtragem do álcool. A MQ realiza a secagem do álcool na peça. A MQ retira a peça do álcool automaticamente.
Que aspetos tomaria em consideração ao comprar o produto?	Teria em consideração a automatização do processo de preferência com a cura incluída. Ter um modo de limpeza/filtragem do álcool.		A MQ tem um funcionamento automático. A MQ cura as peças depois de estas serem limpas. A MQ filtra o álcool isopropílico.
Que características deveria ter o produto?	Para mim a mais importante característica da máquina seria a automatização pois permitiria reduzir as 4 intervenções que tenho de realizar para apenas duas e como tal reduziria bastante o trabalho investido em todo o processo.		A MQ necessita no máximo de duas intervenções por parte do utilizador.
Qual o preço máximo que estaria disposto a pagar pelo produto?	1000€ seria um preço adequado tendo em consideração que a máquina faz a limpeza e cura automaticamente.		A MQ custa 1000€

Grau de importância de cada característica

Numa escala de 1 a 5, sendo 1 o menos importante e 5 o mais importante, classifique os seguintes aspetos:

2 Rapidez (tempo de limpeza) 1h/2h para todo o processo seria ótimo.

5 Eficiência

1 Peso

4 Tamanho: Qual seria o tamanho ideal: O tamanho mais ou menos de uma impressora.

5 Preço

3 Consumo Energético

3 Fácil instalação

1 Portabilidade

5 Automatização

5 Fácil Manutenção

5 Design exterior

4 Adaptação a máquinas específicas (possibilidade de ser adaptada a máquinas específicas)

Obrigado!!!!

António Miguel Quintela de Saldanha
Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa
Mestrado em Engenharia Mecânica, MIEMc
Nº de aluno: 42657

Cliente:	Manuel Sardinha	Entrevistador:	António Saldanha
Empresa/Instituição:	IST, Investigação	Data:	21/11/2018
e-mail:	manuelcfsardinha@gmail.com	Utilização típica:	Produtos finais/componentes de manutenção
Deseja ter seguimento?	sim	Tipo de utilizador:	Profissional
Questão:	Declaração do cliente:		Necessidade Interpretada:
Quando e porque é que utiliza este tipo de produto (máquina de limpeza de peças)?	Utilizo a impressão 3D diariamente e como tal tenho de realizar a limpeza e cura das peças depois de serem impressas. Atualmente utilizo um tupperware com álcool isopropílico.		A MQ realiza a limpeza das peças impressas de modo a retirar toda a resina não curada.
Se conhece algum produto similar existente, quais as características que o agradam nesse produto?	Já ouvi falar de umas máquinas de vapor de álcool que alisam a superfície das peças impressas em FDM mas de limpeza de peças impressas em SLA nunca ouvi falar de nenhuma.		
O que é que não o agrada em produtos existentes?	Não gosto que o processo seja manual pois requer várias intervenções por parte do utilizador.		A MQ é automática.
Que aspetos tomaria em consideração ao comprar o produto?	Teria principalmente em consideração o preço da máquina e a capacidade de a mesma ser adaptável a várias impressoras.		A MQ tem um preço acessível. A MQ é adaptável a diversas impressoras.
Que características deveria ter o produto?	Não deveria ter consumíveis para que o utilizador não tenha de trocar peças de x em x utilizações, mas como é óbvio que este caso não se aplica ao IPA.		A MQ funciona sem consumíveis.
Qual o preço máximo que estaria disposto a pagar pelo produto?	Não estou muito familiarizado com os preços destas máquinas, mas diria que qualquer coisa entre 50% e 80% do valor de uma impressora seria bastante acessível.		A MQ custa entre 50-80% do preço de uma impressora.

Grau de importância de cada característica

Numa escala de 1 a 5, sendo 1 o menos importante e 5 o mais importante, classifique os seguintes aspetos:

4 Rapidez (tempo de limpeza)

5 Eficiência

1 Peso

3 Tamanho: Qual seria o tamanho ideal: Ocupar o canto de uma secretária

4 Preço

3 Consumo Energético

2 Fácil instalação

2 Portabilidade

4 Automatização

4 Fácil Manutenção

1 Design exterior

5 Adaptação a máquinas específicas (possibilidade de ser adaptada a máquinas específicas)

Obrigado!!!!

António Miguel Quintela de Saldanha
Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa
Mestrado em Engenharia Mecânica, MIEMc
Nº de aluno: 42657

Cliente:	Nuno Frutuoso	Entrevistador:	António Saldanha
Empresa/Instituição:	IST, Investigação	Data:	21/11/2018
e-mail:	nunoammfutuoso@gmail.com	Utilização típica:	Prototipagem/ modelos funcionais e rigorosos
Deseja ter seguimento?	Sim	Tipo de utilizador:	Profissional
Questão:	Declaração do cliente:		Necessidade Interpretada:
Quando e porque é que utiliza este tipo de produto (máquina de limpeza de peças)?	Utilizo a impressão em SLA para imprimir peças isotrópicas, com bastante rigor e sem layers e como tal utilizo este tipo de produtos para proceder à limpeza das peças depois destas serem impressas para retirar o excesso de resina não curada que fica agarrada à peça.		A MQ realiza a limpeza das peças impressas de modo a retirar toda a resina não curada.
Se conhece algum produto similar existente, quais as características que o agradam nesse produto?	Tenho conhecimento que a marca Formlabs tem uma máquina que faz a limpeza de peças em álcool isopropílico, mas não conheço o processo e como funciona.		A MQ tem um objetivo e funcionamento claro.
O que é que não o agrada em produtos existentes?	De momento realizo a limpeza com os recipientes fornecidos pela impressora que é basicamente um tupperware com IPA onde se mergulha a peça, sem qualquer tipo de agitação. É um processo químico e como tal as peças não curadas têm de ser manuseadas com cuidado e todo o processo de retirar as peças da mesa de impressão é difícil e pode danificar as peças. Todo o processo é demorado, desde que se retira a peça da impressora até à peça estar curada.		A MQ tem agitação do álcool isopropílico. Tem acessórios para manusear as peças. Todo o processo demora pouco tempo.
Que aspetos tomaria em consideração ao comprar o produto?	Para começar, acho que não existe quase oferta pelo que já existir um produto que realize a limpeza das peças automaticamente já é ótimo. As peças teriam de ficar bem limpas e bem-curadas. Possibilidade de a máquina ser configurável a vários tipos de resina é uma mais valia. A máquina teria de ser consistente, ou seja, se realizasse a limpeza de 100 peças, essas 100 peças teriam de ficar todas igualmente bem limpas.		A MQ limpa e cura eficazmente as peças. A MQ é configurável a todo o tipo de resinas. A MQ limpa todas as peças do mesmo modo.
Que características deveria ter o produto?	A automatização do processo é bastante importante. Seria bom haver um desbaste de material controlável na superfície das peças e se possível ajudar a retirar os suportes.		A MQ é automática. A MQ controla o desbaste de material da superfície. A MQ remove os suportes das peças.

Qual o preço máximo que estaria disposto a pagar pelo produto?	Do que conheço do mercado, penso que estaria disposto a pagar 500€ no mínimo por uma máquina que fizesse a limpeza em IPA e 1000€ por uma máquina que realizasse a limpeza e cura.	A MQ custa entre 500€ e 1000€
--	--	-------------------------------

Grau de importância de cada característica

Numa escala de 1 a 5, sendo 1 o menos importante e 5 o mais importante, classifique os seguintes aspetos:

4 Rapidez (tempo de limpeza)

5 Eficiência

1 Peso

2 Tamanho: Qual seria o tamanho ideal: O tamanho mais ou menos de uma impressora.

4 Preço

4 Consumo Energético

5 Fácil instalação

2 Portabilidade

5 Automatização

5 Fácil Manutenção

3 Design exterior

5 Adaptação a máquinas específicas (possibilidade de ser adaptada a máquinas específicas)

Obrigado!!!!

António Miguel Quintela de Saldanha
 Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa
 Mestrado em Engenharia Mecânica, MIEMc
 N° de aluno: 42657

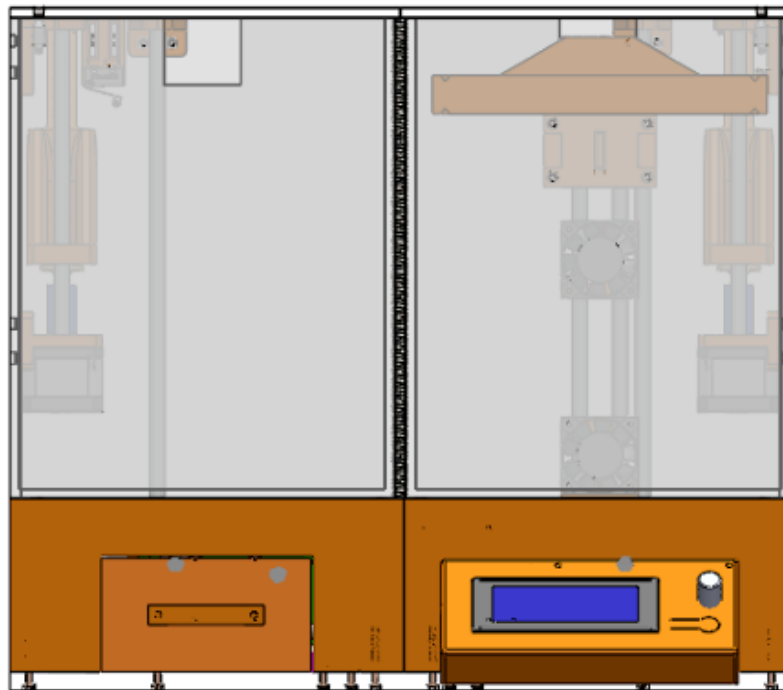
Anexo B – Lista de peças

Peça	Quantidade	Preço/ unidade (€)	Observações
Recipiente	2	38.50	Encomenda por medida. Material- vidro acrílico.
Placa inferior	1	28	
Placa traseira	1	32	
Placa separadora	1	10	
Tampa dos recipientes	2	7.50	
Suporte IPA	1	4.11	Fabricadas por MA Material - PLA
Suporte Cura	1	4.70	
Suporte placa separadora	2	2.78	
Tampa dos suportes	2	2.37	
Gaveta	1	3.87	
Cobertura do controlador	1	1.09	
Estrutura mecanismo 1.1	1	2.11	
Estrutura mecanismo 1.2	1	3.57	
Braço inferior	1	0.92	
Braço superior	1	2.98	
Suporte motores de vibração	1	0.67	
Peças de vibração	2	0.05	
Adaptador 1	1	0.17	
Adaptador 2	1	0.24	
Suporte ventoinhas	2	0.09	
Suporte motor central	1	0.33	
Suporte inferior varões verticais	2	0.11	
Suporte superior varões verticais	2	0.11	
Suporte motores mecanismo das tampas	2	0.27	
Braço de elevação mecanismo das tampas	2	0.61	
Suporte varões mecanismo das tampas	2	0.13	
Suporte sensores caixa	4	0.08	

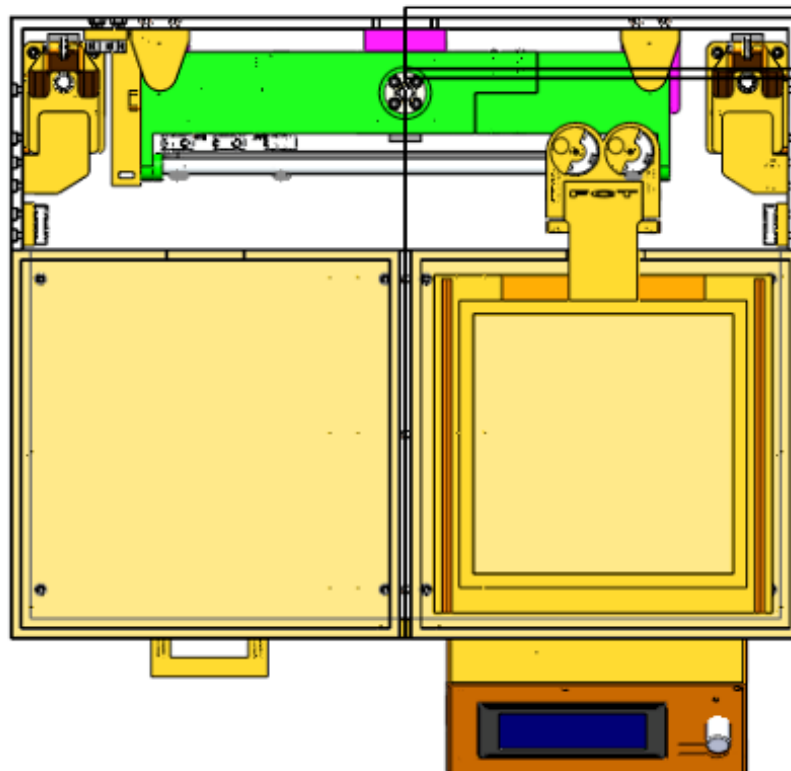
exterior			
Suporte sensores estrutura do mecanismo	2	0.22	
Fixadores cablagem elétrica	13	0.01	
Motor Nema 17 com fuso trapezoidal	1	39.90	Peças compradas
Motor Nema 17	3	16.75	
Motor 12VDC 6900rpm	2	1.60	
Cabo para Nema 17	4	2.20	
Rolo de fio de cobre	10 (m)	0.83	
União rígida	2	4.85	
Fuso trapezoidal 8mm	0.3 (m)	9.90	
Varão liso 8mm	2 (m)	10.80	
Cabo e fichas Dupont	4	0.85	
Sensores endstop	4	1.58	
Kit ramps 1.4	1	59.85	
Interruptor ON/OFF	1	2.43	
Ventoinha 40mm 12V	2	8.93	
Polia GT2 dentada	1	1.46	
Polia de alinhamento dentada GT2	2	1.97	
Polia de alinhamento lisa GT2	1	1.97	
Correia GATES	1	5.50	
Parafusos M3	151	0.04	
Porcas M3	133	0.04	
TOTAL	373 peças	458.96 €	

Anexo C – Vistas da máquina

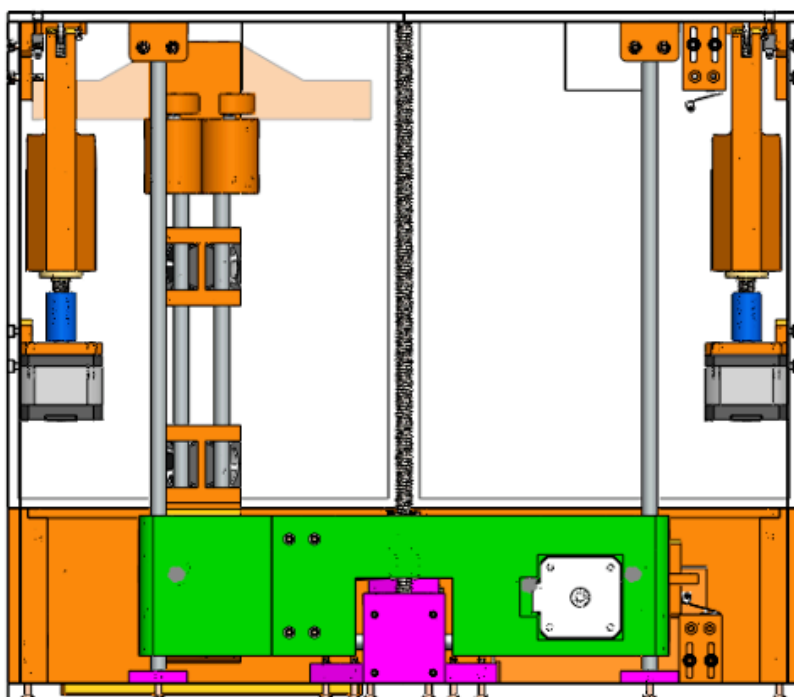
Vista frontal



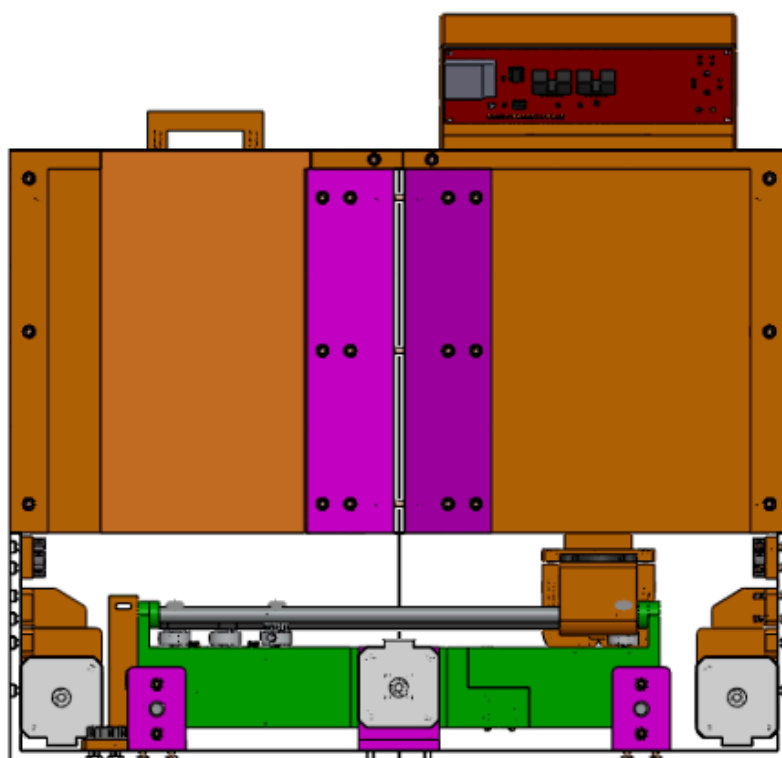
Vista superior



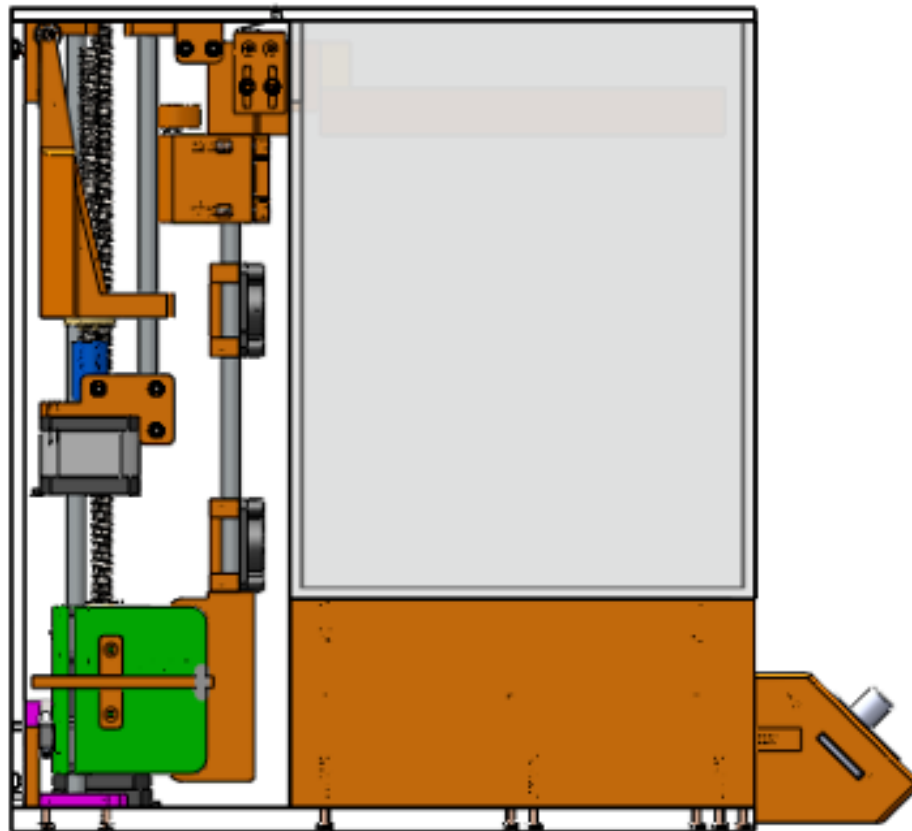
Vista traseira



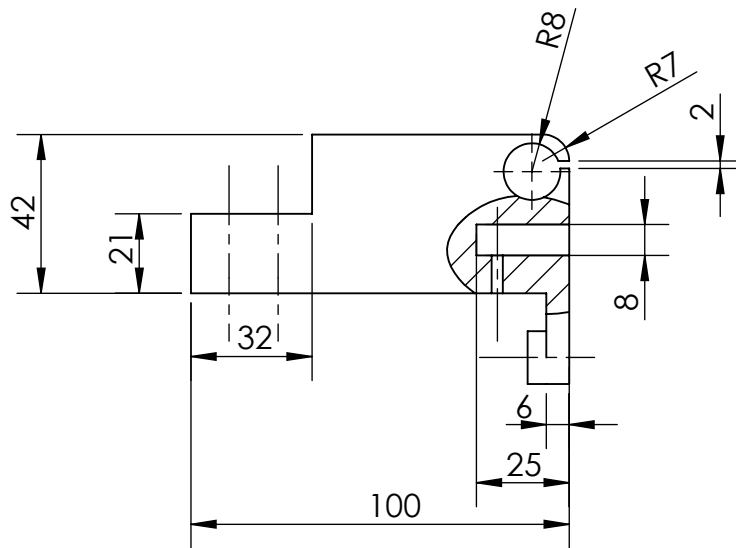
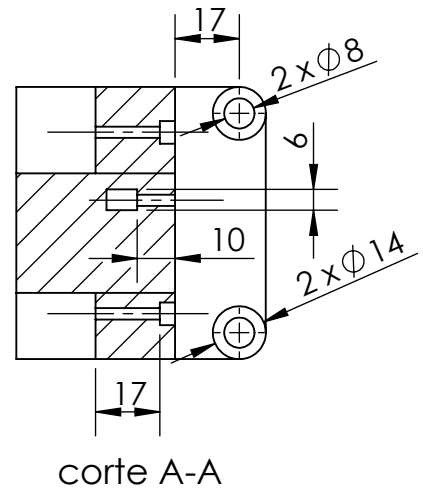
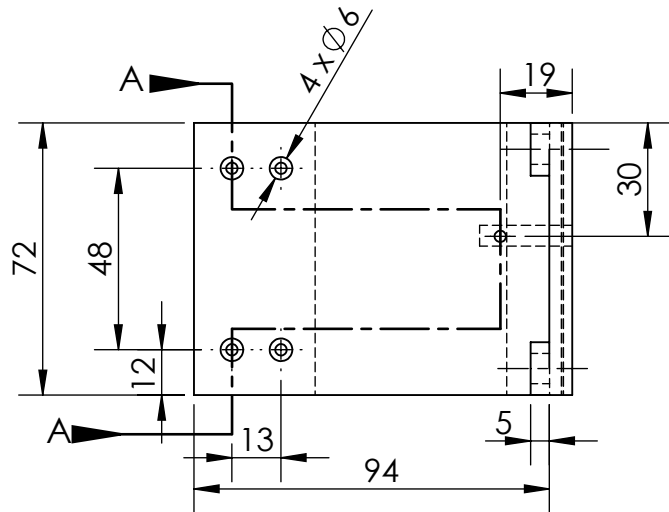
Vista inferior



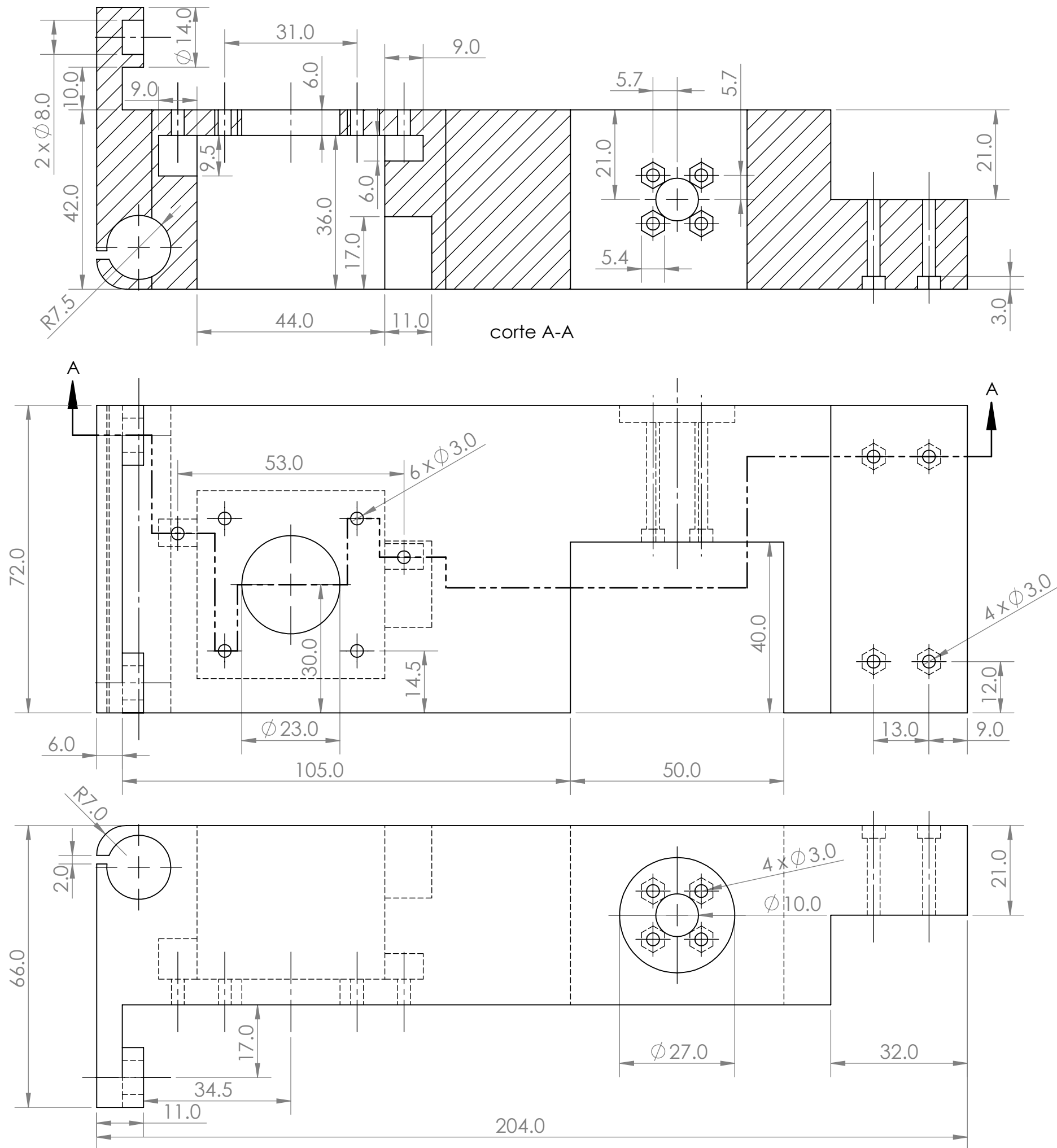
Vista lateral esquerda



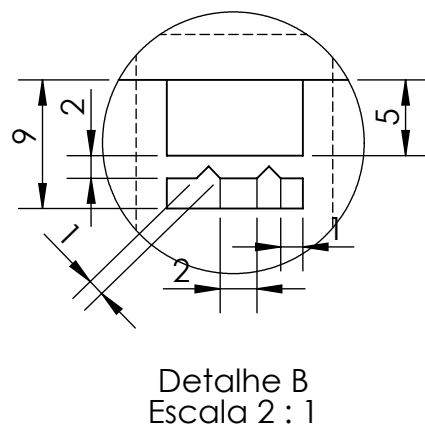
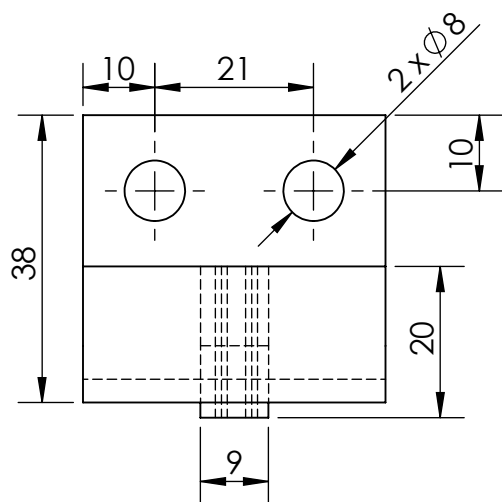
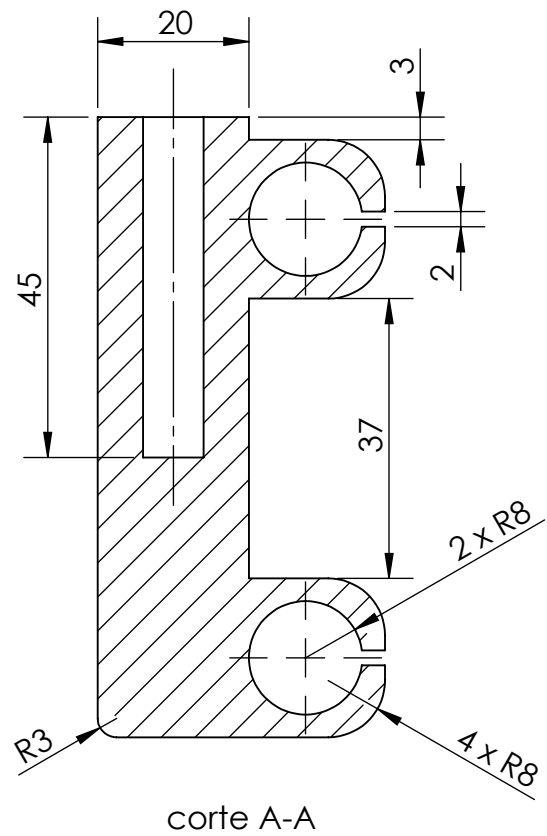
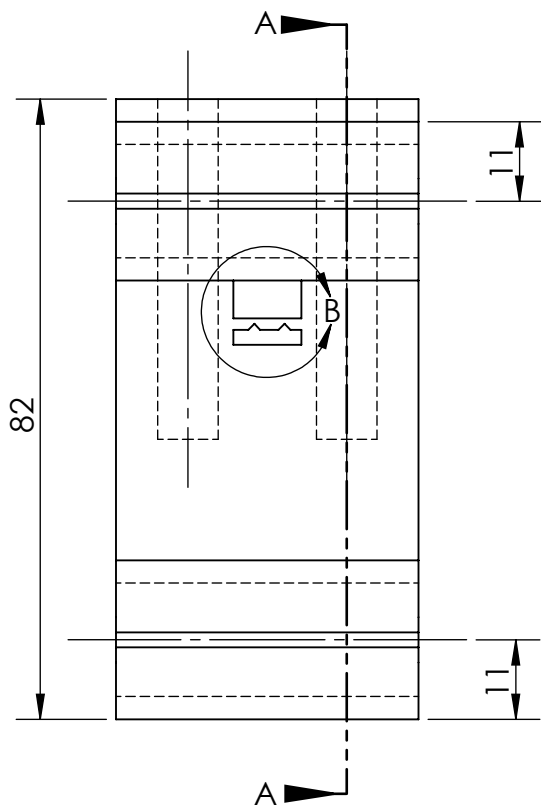
Anexo D – Desenhos técnicos 2D



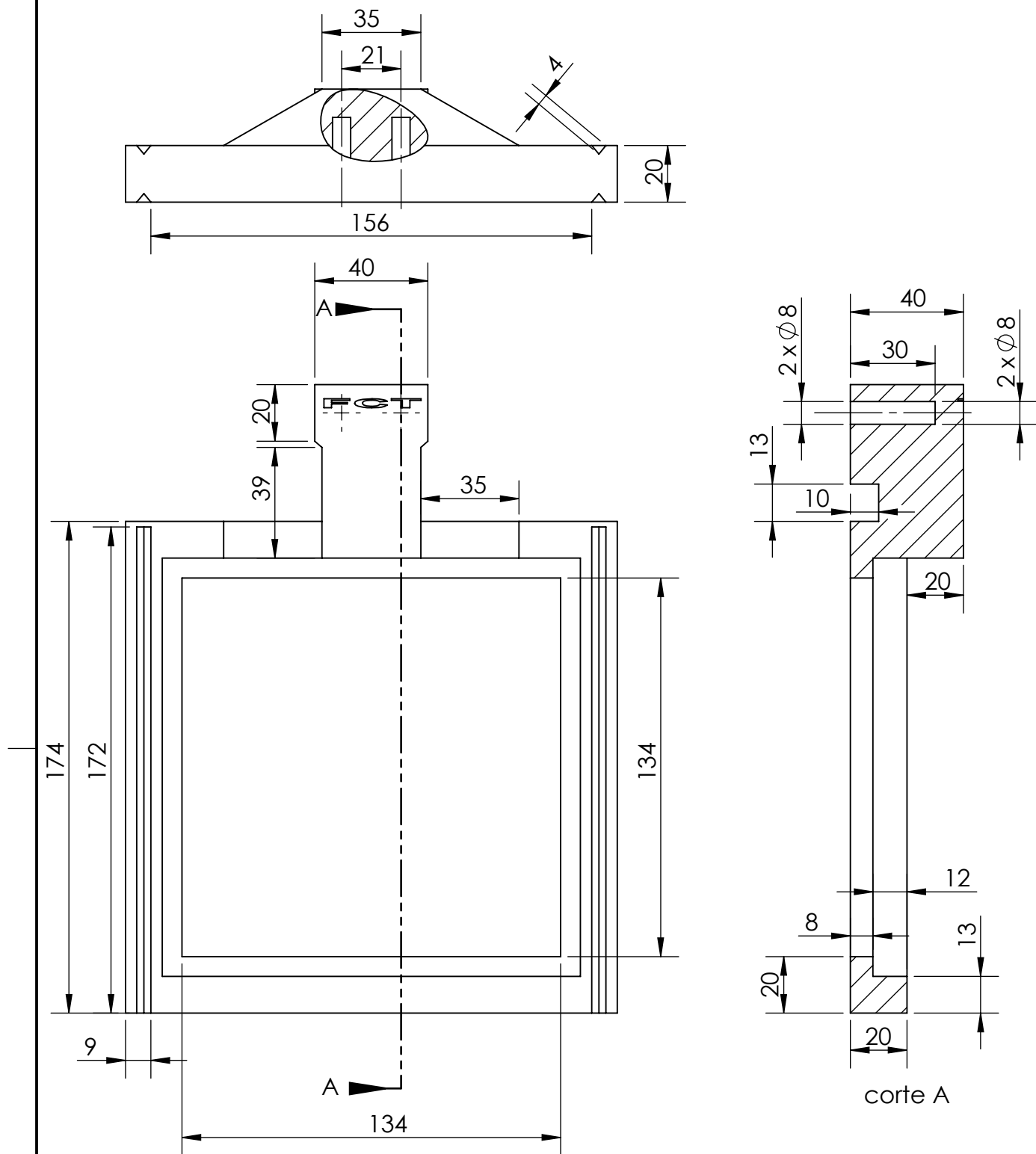
Escala 1:2	Rúbrica	Data	Protótipo	
	Desenhou	5/30/2019		
Material: Poliácido láctico (PLA)	Verificou		Nome: António Saldanha n.º42657	
Tolerância Geral: ISO 2768 - c	Projectou		Curso: MIEMc	
Acabamentos: rugosidade geral	Fabricou		Estrutura 1.2	
Notas:			Folha A4	Folha 1
			Desenho n.º 001	



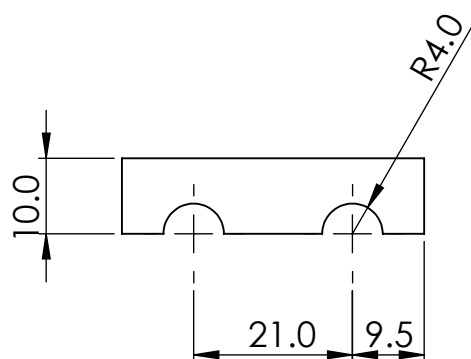
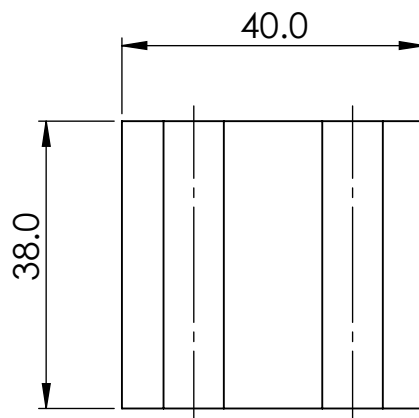
Escala 1:2		Desenhou	Rúbrica	Protótipo		
Material: Poliácido láctico (PLA)		Verificou		Nome: António Saldanha n.º42657 Curso: MIEMc		
		Projectou				
		Fabricou				
Tolerância Geral: ISO 2768 - c		Data: 14/03/2019				
Folha A3		Desenho n.º 002		Folha 1		



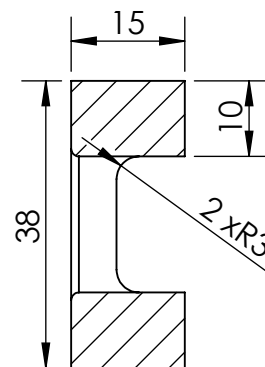
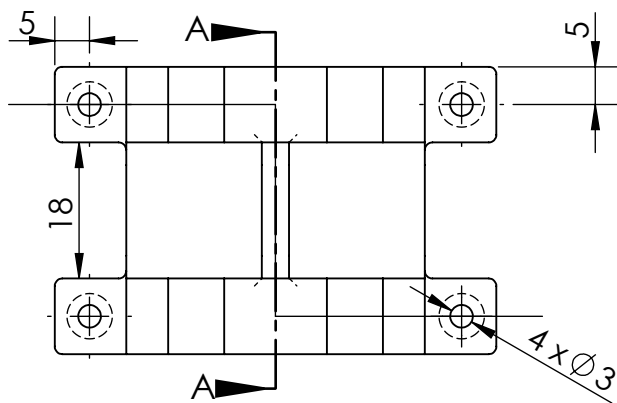
Escala 1:2	Desenhou	Rúbrica	Protótipo	
	Verificou		Nome: António Saldanha n.º42657	
Material: Poliácido láctico (PLA)	Projectou	Data:	Curso: MIEMc	
Tolerância Geral:	Fabricou		Braço 1.1	
ISO 2768 - c	14/03/2019	Folha A4	Desenho n.º 003	Folha 1



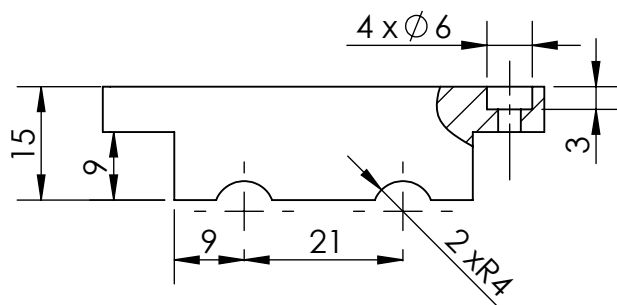
Escala		Rúbrica		Protótipo		
1:2		Desenhou		Nome: António Saldanha Curso: MIEMc		
		Verificou				
		Projectou				
		Fabricou				
Material:				n.º42657		
Poliácido láctico (PLA)						
Tolerância Geral:		Data:		Braço 1.2		
ISO 2768 - c		14/03/2019				
				Folha	Desenho n.º	Folha
				A4	004	1



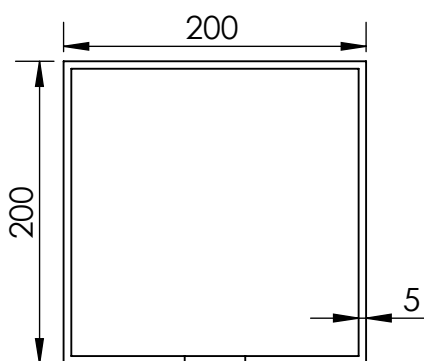
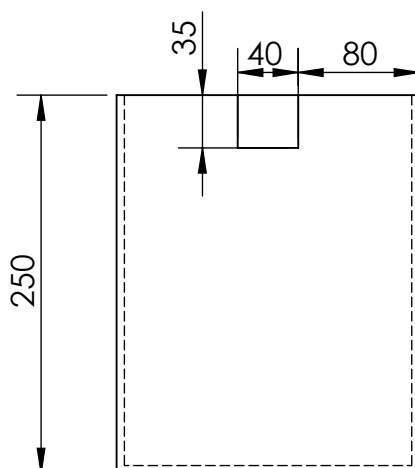
Escala		Rúbrica		Protótipo		
1:1		Desenhou		Nome: António Saldanha n.º42657 Curso: MIEMc		
		Verificou				
Material:		Projectou		Adaptador 1.1		
Poliácido láctico (PLA)		Fabricou				
Tolerância Geral:						
ISO 2768 - c		Data:				
		14/03/2019				
		Folha	Desenho n.º		Folha	
		A4	005		1	



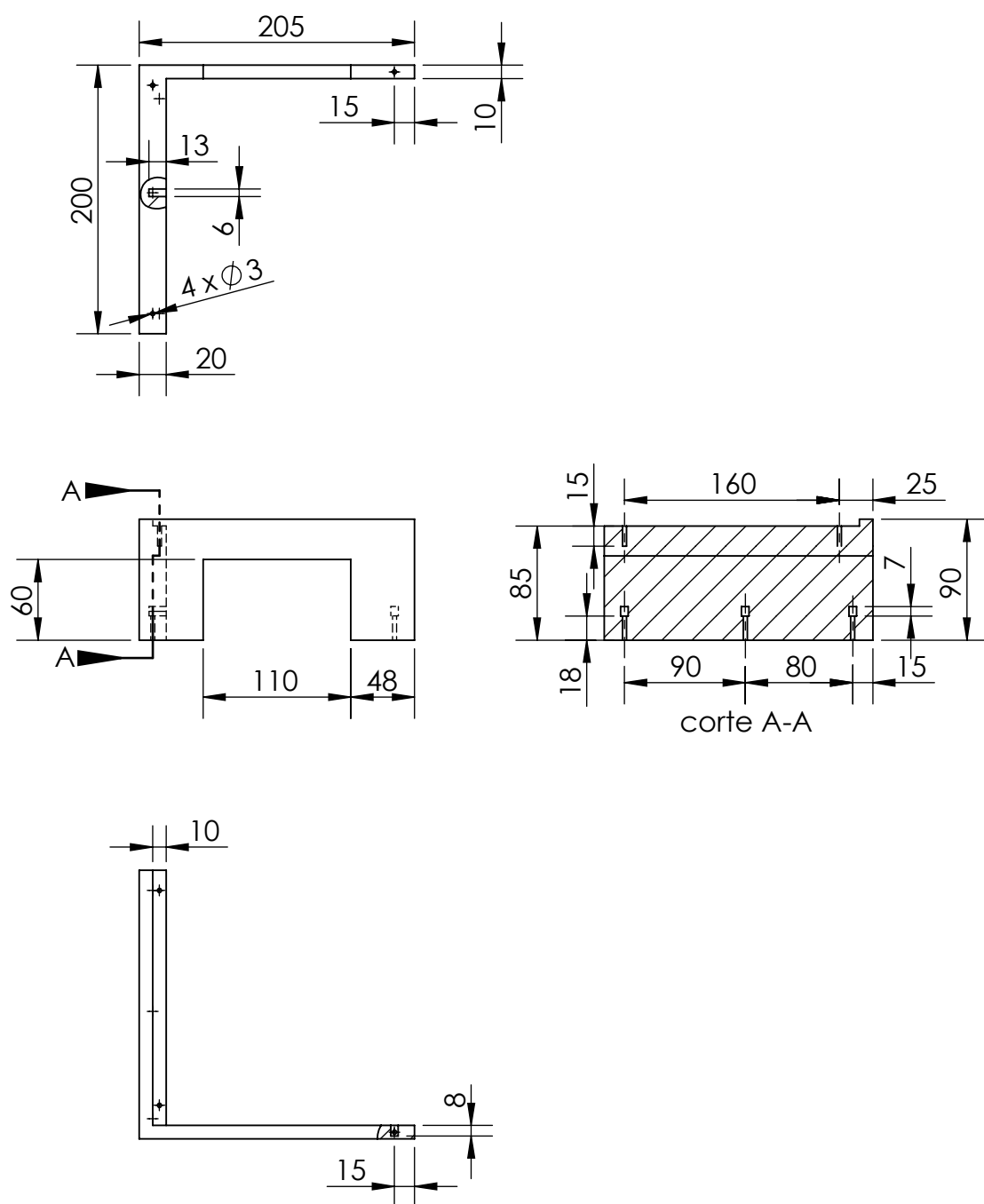
corte A-A



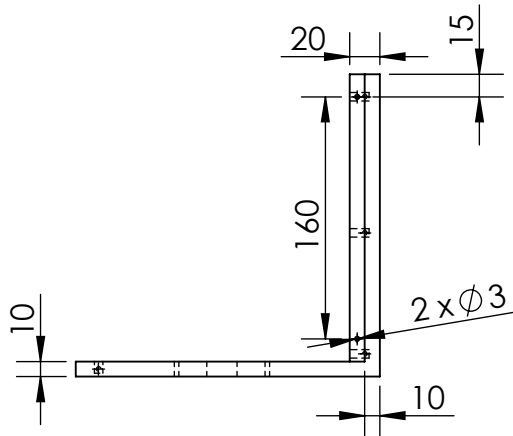
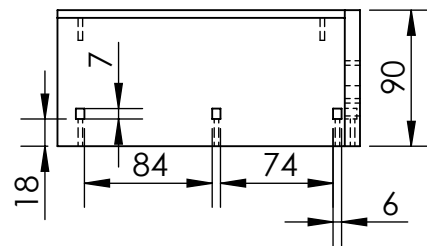
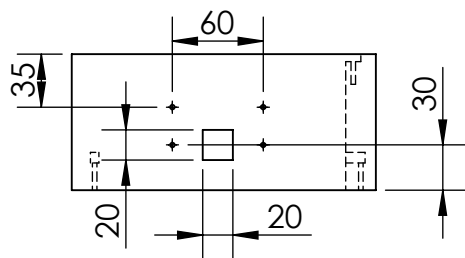
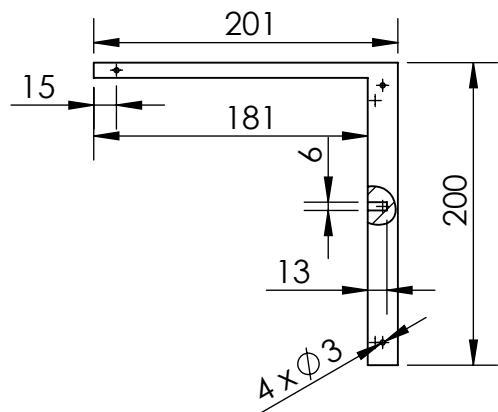
Escala		Rúbrica		Protótipo	
1:1		Desenhou	Nome: António Saldanha n.º42657 Curso: MIEMc		
		Verificou			
		Projectou			
		Fabricou			
Material:		Adaptador 1.2			
Poliácido láctico (PLA)					
Tolerância Geral:		Data:			
ISO 2768 - c		14/03/2019			
		Folha	Desenho n.º		Folha
		A4	006		1



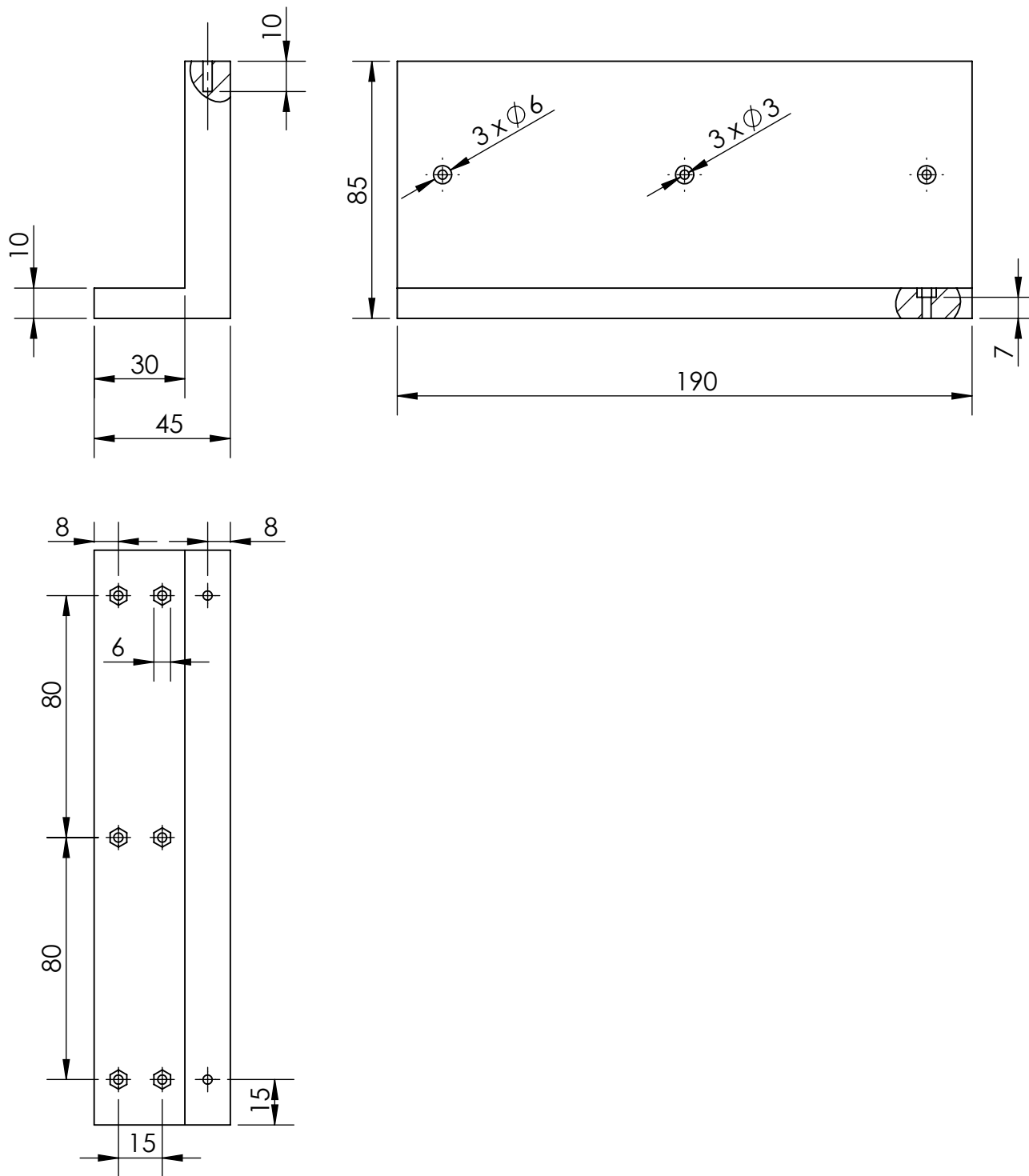
Escala 1:5 Material: Poliácido láctico (PLA) Tolerância Geral: ISO 2768 - c		Rúbrica	Protótipo		
	Desenhou		Nome: António Saldanha n.º42657 Curso: MIEMc		
	Verificou				
	Projectou		Recipiente		
	Fabricou				
	Data:	14/03/2019			
			Folha A4	Desenho n.º 007	Folha 1



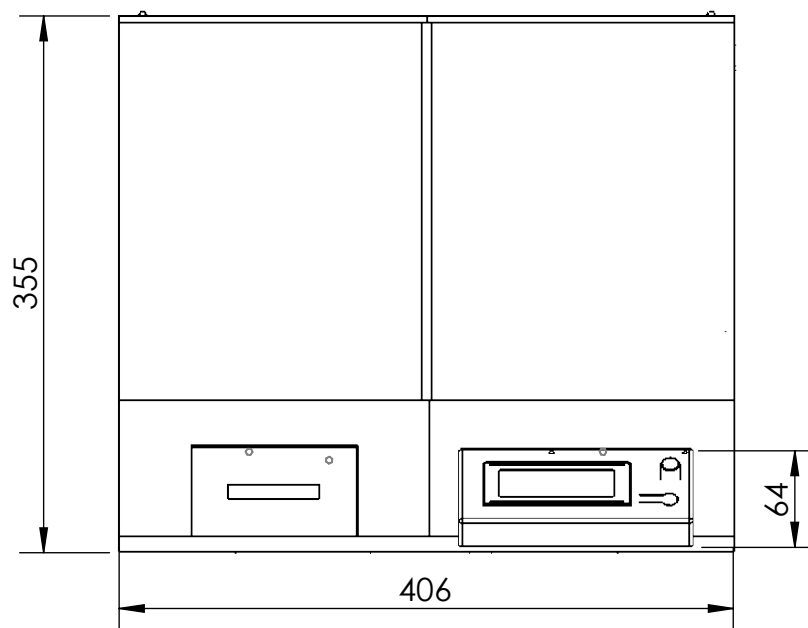
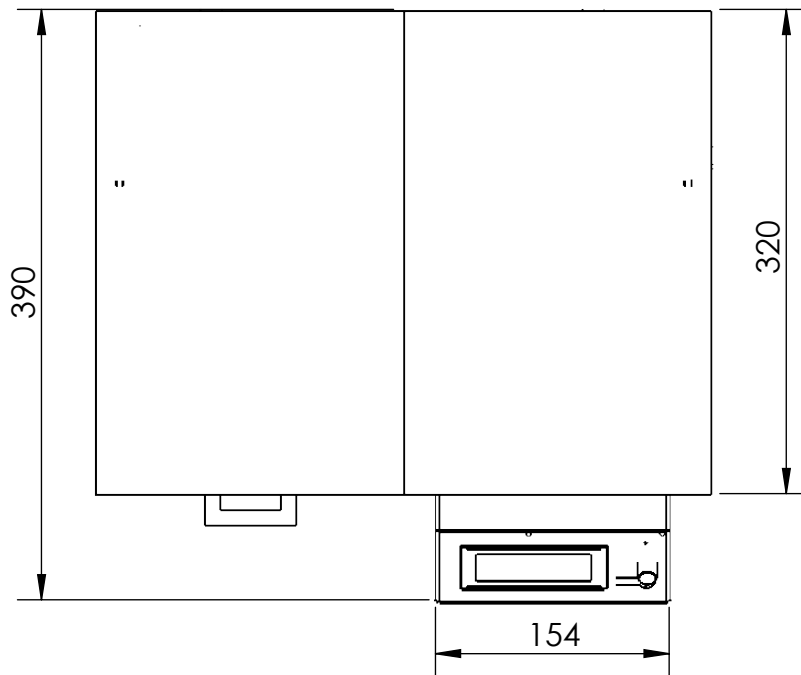
Escala 1:5 Material: Poliácido láctico (PLA) Tolerância Geral: ISO 2768 - c		Rúbrica Desenhou Verificou Projectou Fabricou Data: 14/03/2019	Protótipo		
			Nome: António Saldanha n.º42657		
			Curso: MIEMc		
			Suporte IPA		
Folha A4		Desenho n.º 008			Folha 1



Escala		Rúbrica	Protótipo		
1:5	Desenhou		Nome: António Saldanha n.º42657 Curso: MIEMc		
	Verificou				
	Projectou				
Material:	Projectou		Suporte cura		
Poliácido láctico (PLA)	Fabricou				
Tolerância Geral:					
ISO 2768 - c	Data:	14/03/2019	Folha A4		
			Desenho n.º		Folha
			009		1



Escala 1:2	Rúbrica		Protótipo	
	Desenhou		Nome: António Saldanha n.º42657 Curso: MIEMc	
	Verificou			
	Projectou			
Material: Poliácido láctico (PLA)	Fabricou	Data: 14/03/2019	Suporte separador	
Tolerância Geral: ISO 2768 - c				
			Folha A4	Desenho n.º 010 Folha 1



Escala		Rúbrica		Protótipo	
1:5		Desenhou			
		Verificou			
		Projectou			
		Fabricou			
Material:		Nome: António Saldanha n.º42657			
Poliácido láctico (PLA)		Curso: MIEMc			
Tolerância Geral:		Dimensões gerais			
ISO 2768 - c					
		Data:			
		14/03/2019			
		Folha	Desenho n.º		Folha
		A4	011		1